

Sensoriamento remoto hiperespectral e quimiometria aplicados ao mapeamento de materiais geológicos saturados em hidrocarbonetos: Novos ensaios e potencial de aplicação para exploração petrolífera *onshore*

Rebecca Del'Papa Moreira Scafutto¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Wilson José de Oliveira²

¹Instituto de Geociências - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
beccadpms@hotmail.com, beto@ige.unicamp.br

²PETROBRÁS – Engenharia/IETEG/ETEG/EAMB
Av. Almirante Barroso, 81, 12o andar, Centro - 20031-000 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
wilsonjo@petrobras.com.br

Abstract. In this work, reflectance spectroscopy and chemometric techniques were used to remotely identify hydrocarbons (HCs) in mineral substrates, through a case study performed in Casper (Wyoming, USA). A macro-experiment was designed where three soil types (sandy, clayey, calcareous) were mixed with various HCs (crude oils °API 29 and 41, diesel and gas). Spectral data were collected within Near and ShortWave Infrared (NIR-SWIR) wavelengths, employing a FiedSpec Hi-Res spectrometer and the ProSpecTIR-VS airborne hyperspectral imager. The geometry, depth and wavelength position of HCs spectral absorption features (1700 and 2300 nm) were used to characterize and differentiate several spectral mixtures. Principal Component Analysis of the spectral data allowed estimating the HC type and concentration. Spectral mixing analysis of the hyperspectral imagery yielded seamless maps of the HC-rich sites. The data and methods investigated here show that it is possible to quickly indentify soils (and rocks) saturated with HCs remotely in a operational manner. This represents an unprecedented progress in applications for both HC onshore exploration and environmental monitoring of HC leakages based on remote sensing techniques.

Palavras-chave: seepage, hydrocarbon, infrared, exsudações, hidrocarboneto, infravermelho

1. Introdução

A economia global está fortemente relacionada às matrizes energéticas, principalmente com a exploração e produção de petróleo e produtos derivados. Em paralelo, a necessidade de sustentabilidade ambiental requer monitoramento constante e detecção precoce de vazamentos de hidrocarbonetos (HCs), tanto em terra como no mar. Neste contexto, as ferramentas de sensoriamento remoto (SR) apresentam potencial para fomentar programas de prospecção mais rápidos e eficazes, bem como podem fornecer informações a respeito da localização e espalhamento de vazamentos de óleo que auxiliem nas operações de limpeza e contenção.

Pesquisas que objetivam o estudo das respostas espectrais de HCs em substratos minerais, obtidas nos comprimentos de onda no visível, infravermelho próximo e de ondas curtas (VNIR/SWIR – *Visible / Near InfraRed / Short Wave InfraRed*), vêm sendo realizadas desde a década de 80 com os estudos de Cloutis (1989) e Winkelmann (2005).

O desenvolvimento de sensores hiperespectrais (SEBASS, ProSpecTIR-VS), coloca-se como uma alternativa promissora para esses fins, principalmente nas bacias terrestres (*onshore*), uma vez que permitem a detecção, mapeamento e caracterização direta dos HCs. A elevada resolução espectral dos dados hiperespectrais permite ainda a comparação direta dos

mesmos com dados de campo e laboratório (Sanchez *et al.*, 2003). Contudo, os espectros VNIR/SWIR de HCs contêm bandas de absorção largas resultantes da sobreposição de feições de absorção individuais, o que torna complexa sua interpretação (Lammoglia & Souza Filho, 2009). Uma alternativa a esse problema é o uso de técnicas quimiométricas, em particular a Análise por Componentes Principais (ACP), que possibilita a redução de um grande número de variáveis espectrais em poucas variáveis ortogonais. O uso conjunto de técnicas de espectroscopia e quimiometria (Chung *et al.*, 1999; Rivard *et al.*, 2010), possibilitam a caracterização detalhada de HCs em misturas com substratos minerais. Os padrões obtidos a partir destes dados podem orientar o uso de algoritmos de classificação e auxiliar na identificação direta de alvos impregnados com HCs em bacias *onshore* com base em imagens hiperespectrais aerotransportadas, algo ainda não demonstrado na literatura.

No sentido de verificar essa premissa, um estudo de caso foi elaborado através de um macro-experimento de impregnação de substratos minerais variados, com diferentes tipos de HCs, envolvendo medições espectrais simultâneas *in situ* no campo e a partir de sensores hiperespectrais imageadores aerotransportados. O objetivo principal desse estudo foi avaliar a eficácia do uso do SR hiperespectral para a caracterização quantitativa e qualitativa de HCs, bem como demonstrar a operacionalidade do mesmo para a identificação direta de HCs em regiões continentais afetadas por exsudações (ou vazamentos).

2. Metodologia de Trabalho

A biblioteca espectral de referência de Scafutto & Souza Filho (2011) foi aqui utilizada como base para a elaboração do macro-experimento, bem como para as análises espectral e quimiométrica dos dados gerados nesta pesquisa. A elaboração desta biblioteca compreendeu um micro-experimento de impregnação em laboratório, entre diferentes tipos e concentrações de HCs (óleos crus de °API 19.2 – O1, 27.5 – O2 e 43.5 – O3) e combustíveis (óleo diesel, gasolina e etanol) com variados substratos minerais (solos ricos em caulinita, montmorilonita, gibsitita, quartzo, além de solos com calcário e latossolo roxo). As medições espectrais de cada fase de impregnação foram feitas com o equipamento *FieldSpec 3 Hi-Res*.

O macro-experimento foi desenvolvido no *Rocky Mountain Oilfield Testing Center* (ROMTC) da *Naval Petroleum Reserve-3*, localizado ao norte da cidade de Casper (Wyoming), Estados Unidos (Figura 1).

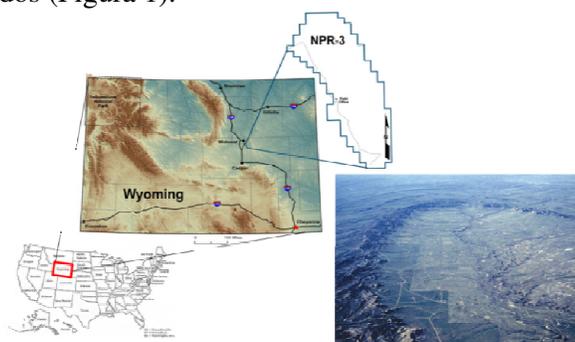


Figura 1. Localização da área de estudo e vista aérea do RMOCT.

Quatro amostras de hidrocarbonetos e três substratos minerais foram selecionados para a realização do experimento. Os HCs são compostos por duas amostras de óleo cru com graus API 29 e 41 (óleo pesado e óleo leve), óleo diesel e gasolina. Os substratos minerais são compostos por areia, dolomita e argilas, todos com granulometria variada. Os HCs foram misturados aos substratos minerais, totalizando 12 amostras, as quais foram medidas com um sensor perfilador ultraspectral e com um sensor imageador hiperespectral aerotransportado.

As misturas foram preparadas em campo, em caixas de madeira com dimensões de 2,44 m x 2,44 m e 0,15 m de profundidade, colocadas em pares com espaçamento longitudinal e

lateral de 20 metros entre si, devidamente protegidas com o intuito de evitar a contaminação ambiental (Figura 2). Os HCs foram adicionados aos substratos em três lotes de 18 litros; 1h, 30 min e 15 min antes do levantamento aéreo, denominadas nos resultados de medida 1, medida 2 e medida 3, respectivamente. Após cada etapa de adição do contaminante ao substrato, foram realizadas medidas espectrais de campo *in situ*. Ao final deste processo cada caixa continha, aproximadamente, 0,40 m³ de um substrato pré-determinado, impregnado com aproximadamente 54 L de cada hidrocarboneto previsto. As especificações das misturas e numeração de cada caixa são apresentadas na Tabela 1.



Figura 2. Preparação do macro-experimento de impregnação de substratos com HCs. (a) e (b) organização das caixas de contaminação no campo, (c) adição do substrato argiloso, (d) adição do hidrocarboneto, (e) medição com sensor ultraspectral portátil. (f) Imagem aérea das caixas de contaminação (numeradas de 1 a 12), com indicação da linha de voo de aquisição das imagens hiperespectrais ProSpecTIR V-S.

Tabela 1: Protocolo de mistura

Solo/HC	Óleo 29	Óleo 41	Diesel	Gasolina
Arenoso	Cx. 1	Cx. 2	Cx. 3	Cx. 4
Dolomítico	Cx. 5	Cx. 6	Cx. 7	Cx. 8
Argiloso	Cx. 9	Cx. 10	Cx. 11	Cx. 12

O espectrorradiômetro portátil FieldSpec® High-Resolution (*Analytical Spectral Devices Inc.*) foi utilizado para realização das medições *in situ* das misturas. Esse instrumento detecta a radiação eletromagnética no intervalo espectral de 350 a 2500 nm com resolução ultraspectral: 3 nm (350 - 1000 nm), 8,5 nm (1000 - 1800 nm) e 6,5 nm (1800 - 2500 nm). Os intervalos de amostragem são de 1,4 nm entre 350 - 1000 nm e 2 nm no intervalo entre 1000 - 2500 nm, compreendendo mais de 2000 canais individuais. O imageamento hiperespectral da área experimental foi realizado em 16-20/08/2010, com o sensor hiperespectral ProSpecTIR-VS. Este sensor trabalha com dois sub-sistemas de imageamento: um na região do visível/infravermelho próximo (VNIR - 400 a 970 nm) e outro na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR) do espectro eletromagnético (970 a 2500 nm).

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas principais, descritas a seguir:

i) Caracterização Espectral: após cada etapa de adição do HC ao substrato, a superfície exposta nas caixas de contaminação foi medida *in situ* com o espectrorradiômetro FieldSpec® Hi-Res. Nestes espectros, as bandas de absorção devido à presença de vapor d'água (regiões centradas em 1400 e 1900 nm) foram removidas, a fim de ressaltar as feições de absorção dos HCs. As imagens obtidas com o levantamento aéreo foram pré-processadas pela empresa SpecTIR. Os dados foram entregues no nível 1 de processamento (i.e. convertido para reflectância e ortoretificado), com 357 bandas distribuídas entre as regiões do VNIR (118) e SWIR (238), 5 nm de resolução espectral e 60 cm de resolução espacial. Espectros foram extraídos de pixels das imagens posicionados sobre as manchas de óleo nos substratos, a fim

de verificar se as assinaturas espectrais dos HCs poderiam ser identificadas nas imagens hiperespectrais.

ii) Análise Estatística Multivariada: a elevada resolução espectral dos sensores utilizados no experimento gerou um grande volume dados, o que torna a ACP uma ferramenta promissora para a sua análise. Este método possibilita a identificação dos valores responsáveis pelas maiores variações nos resultados, através da redução do número de variáveis, sem perda significativa de informação. O software *The Unscrambler X 10.1* foi utilizado para analisar os espectros da biblioteca espectral de referência (Scafutto e Souza Filho, 2011), os espectros obtidos em campo e os extraídos das imagens aerotransportadas por meio da ACP. O objetivo do seu uso nessa etapa foi avaliar as regiões de maior influência dos mesmos bem como a correlação entre os diferentes tipos de dados espectrais.

iii) Mapeamento de HCs em Substratos Terrestres com Imagens Hiperespectrais: o MTMF consiste em um método de classificação supervisionada que utiliza um algoritmo de desmistura espectral parcial para identificar a abundância dos *endmembers* definidos pelo usuário na imagem hiperespectral (Boardman, 1998). Esta técnica fornece um meio rápido de detecção de materiais específicos, considerando a similaridade de sua assinatura com os espectros de referência de uma biblioteca espectral. Este algoritmo de classificação foi aplicado às imagens hiperespectrais ProSpecTIR. Os *endmembers* da imagem a serem classificados consistem no espectro do pixel centralizado em cada caixa de contaminação. Como *endmembers* de referência foram utilizados os espectros da biblioteca espectral de Scafutto e Souza Filho (2011).

3. Resultados e Discussões

3.1. Caracterização Espectral

A análise dos espectros das caixas de contaminação obtidos em campo (Figura 3a-c) permite a separação dos três HCs, com base na geometria da feição de absorção na região de 1700 nm, que os caracteriza. As amostras impregnadas com óleo diesel e gasolina têm uma geometria particular que os diferencia dos demais HCs. Nos gráficos dos óleos crus, a geometria das feições é similar, não sendo possível distinguir o óleo leve do óleo pesado

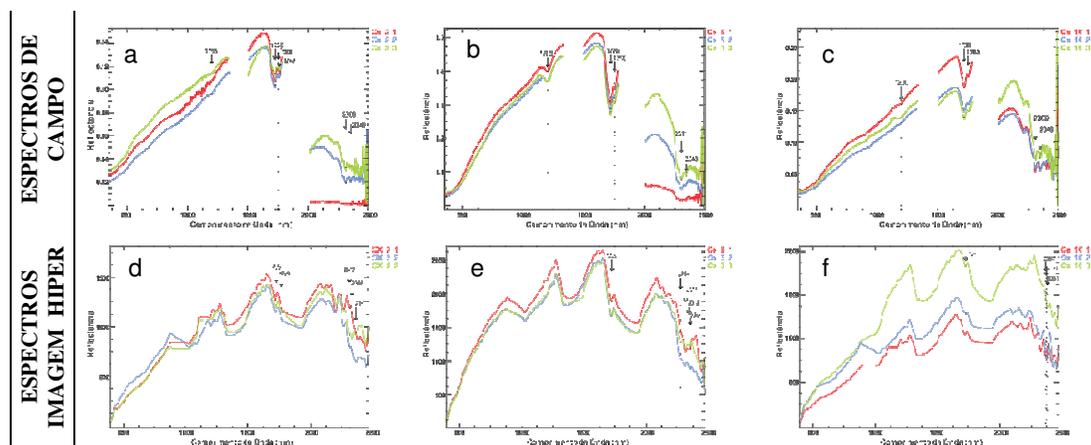


Figura 3: Respostas espectrais das misturas de solo arenoso, dolomítico e argiloso e óleo °API 41. (a, b, c): espectros obtidos em campo. (d, e, f): espectros extraídos de pixels da imagem hiperespectral ProSpecTIR-VS Na legenda, os números após a designação das caixas (Cx) indicam a ordem das medidas após a adição do HC ao substrato (1 = 1hr, 2 = 30 min e 3 = 15 min antes do levantamento aéreo).

O posicionamento das inflexões varia em função da diferença composicional do substrato mineral, nas regiões de 1700 e 2300 nm, evidenciando a influência da granulometria nas

assinaturas espectrais. Por exemplo, nas amostras impregnadas com o óleo 41, as feições de absorção se deslocam de 1763 nm nas caixas com solos dolomíticos e argilosos, para 1759 nm nas caixas com solos arenosos. A profundidade das feições de absorção também varia, sendo mais profundas nas caixas com substrato dolomítico e menos profundas naquelas com substrato arenoso. Nos espectros extraídos das imagens hiperespectrais (Figura 3d-f), a feição de absorção que caracteriza os HCs em 1725 nm está presente e delineada em todas as amostras. No entanto, as feições de absorção na região de 2300 nm não são bem definidas na maioria dos gráficos.

3.2. Análise Estatística Multivariada

➤ *ACP Aplicada aos Dados da Biblioteca Espectral de Referência*

Os espectros da biblioteca espectral de referência, elaborada por Scafutto e Souza Filho (2011), foram submetidos à ACP (Figura 4). As amostras com menores concentrações de HC e combustíveis se posicionam nos quadrantes 2 e 3, enquanto os maiores valores se situam nos quadrantes 1 e 4. O método permite assim a separação espectral entre os compostos leves e pesados. Nas misturas impregnadas com os óleos O1 e O2 (pesado e intermediário), as amostras se alinham seguindo um padrão ascendente, de acordo com o aumento da concentração do HC na mistura (Figuras. 4a e 4b). Já as amostras impregnadas com compostos de densidades mais leves (O3, GAS, DIS e ETN), apresentam um padrão descendente de distribuição (Figuras. 4c-f). Em ambos os casos (compostos leves e pesados), as amostras se agrupam de acordo com o tipo de substrato envolvido na mistura, ressaltando a influência da granulometria e composição dos mesmos na sua assinatura espectral. Apesar das amostras de caulinita se separarem do grupo em todos os gráficos, o alinhamento das amostras permite a distinção entre compostos leves (maior ângulo) e pesados (menor ângulo).

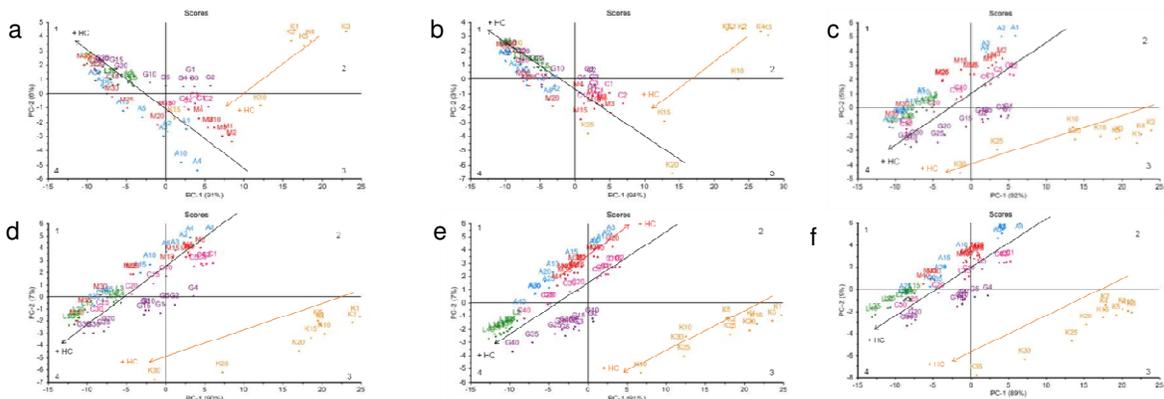


Figura 4: ACP aplicada aos espectros de misturas com a- óleo O1, b-óleo O2, c-óleo O3, d-óleo diesel, e-gasolina, f-etanol. K= solo rico em caulinita. M = solo rico em montmorilonita. C= solo rico em calcário. A = solo arenoso, rico em quartzo. L=solo vermelho (latossolo roxo); G = solo laterítico rico em gibsitita. Os números após as letras indicam a concentração do HC na mistura, em porcentagem. As setas indicam o deslocamento das amostras de acordo com o aumento do HC na mistura com o substrato.

➤ *ACP Aplicada à Diferenciação dos Substratos Minerais e Concentração dos Hidrocarbonetos nas Caixas de Contaminação:*

Nos resultados da ACP dos dados de campo apresentados nas Figuras 5a-c, é clara a separação dos diferentes substratos. As medidas 1 (18L de HC), 2 (36L de HC) e 3 (54L de HC) foram identificadas nas caixas dos solos arenosos e dolomíticos, reforçando a relação da distribuição destas amostras com a concentração do HC na mistura. Nota-se que a distribuição das amostras segue a mesma tendência em todos os casos, se deslocando dos quadrantes inferiores em direção aos superiores, com o aumento da concentração do HC na mistura. Nos

espectros extraídos de pixels da imagem hiperespectral (Figura 5d-f), os diferentes substratos também se separam na maioria dos gráficos. Todavia, os grupos de medidas 1, 2 e 3 não podem ser diferenciados entre si.

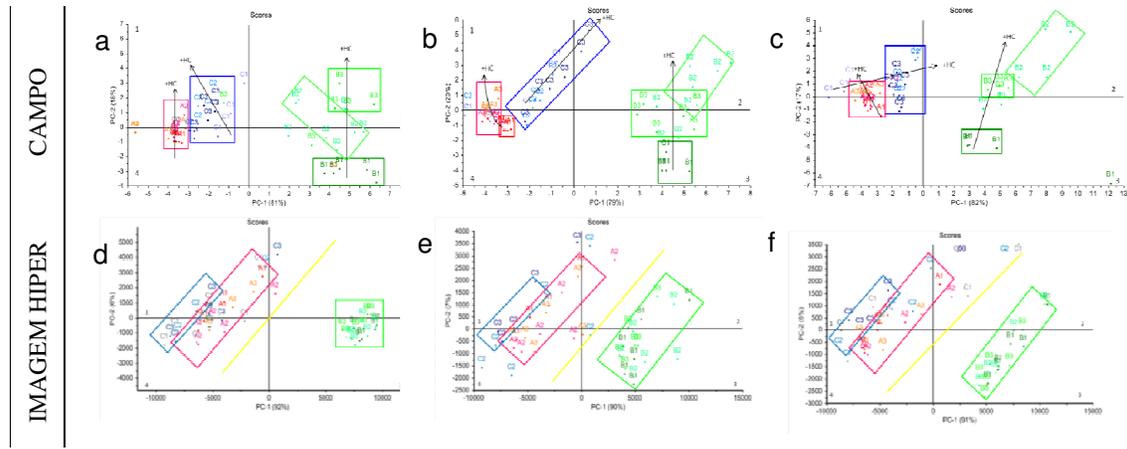


Figura 5. Dados de campo (a,b,c) e dados extraídos da imagem hiperespectral ProspecTIR (d,e,f), de **solos arenosos (A)**, **solos dolomíticos (B)** e **argilosos (C)** impregnados com (a,d) óleo 41, (b,e) óleo diesel, (c,f) gasolina. Medida 1 = 1h; medida 2 = 30 min; medida 3 = 15 min, antes do levantamento aéreo. Os retângulos separam os substratos e as medidas 1, 2 e 3. As setas indicam o aumento da concentração do HC nas medidas e a linha amarela separa os solos dolomíticos dos outros substratos.

3.1. Mapeamento de HCs em Substratos Terrestres com Imagens Hiperespectrais - Potencial para Prospecção Petrolífera Onshore

A elevada resolução das imagens hiperespectrais aqui utilizadas (357 bandas) possibilita a comparação direta de espectros extraídos da imagem com espectros obtidos em campo e laboratório, com sensores ultraespectrais (> 2000 bandas). A Figura 6 apresenta tal comparação entre os espectros extraídos das imagens hiperespectrais ProSpecTIR, espectros obtidos em campo com o espectrorradiômetro FieldSpec Hi-Res e os espectros da biblioteca espectral de referência (Scafutto e Souza Filho, 2011), obtidos também com o FieldSpec Hi-Res.

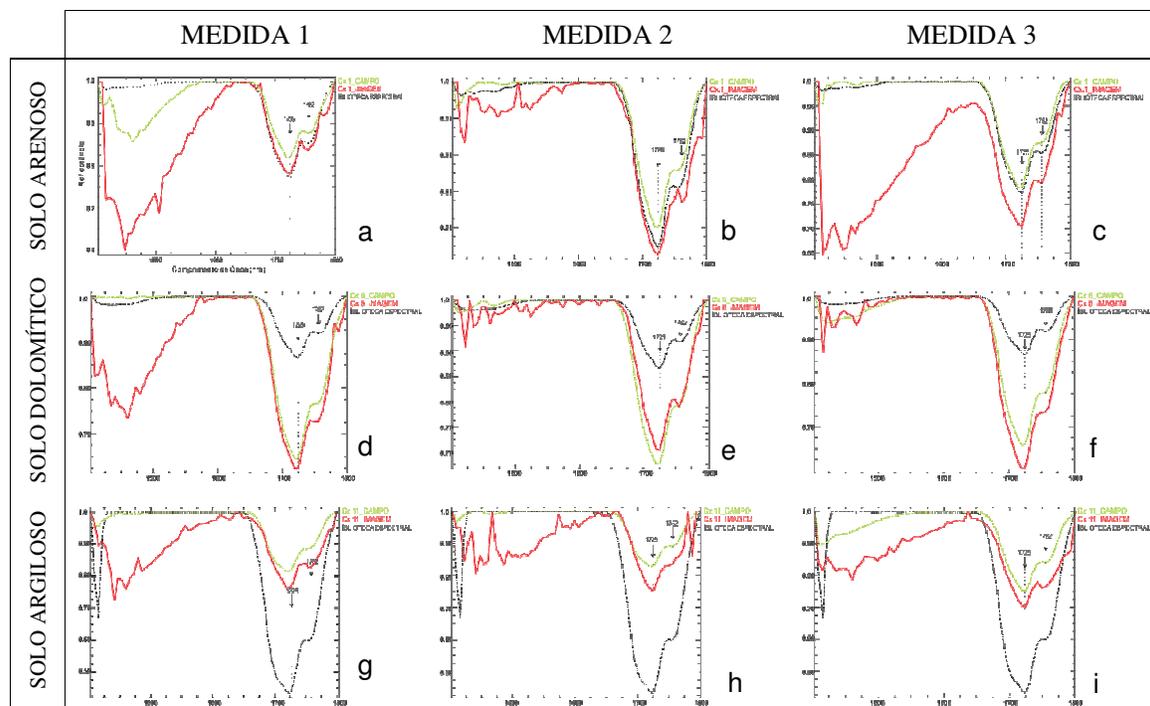


Figura 6: Assinaturas espectrais extraídas das **imagens hiperespectrais (curva vermelha)**, medidas em **campo (curva verde)** e da **biblioteca espectral de referência (curva preta)**, da Caixa 1: com areia impregnada com óleo pesado (a,b,c), da Caixa 11: com argila impregnada com óleo leve (d,e,f) e da Caixa 6 com dolomita impregnada com óleo diesel (g,h,i). Medida 1 = 1h; medida 2 = 30 min; medida 3 = 15 min, antes do levantamento aéreo.

Observando-se os dados apresentados na Figura 6, fica clara a possibilidade de derivar, das imagens hiperespectrais, os *endmembers* que caracterizam os hidrocarbonetos, nos múltiplos substratos, nas regiões de 1700 e 2300 nm. A grande similaridade entre os espectros obtidos em diferentes escalas de aquisição a partir de diferentes sensores, portáteis e aerotransportados, torna viável a utilização de algoritmos de desmistura espectral no mapeamento de pixels em imagens hiperespectrais, capazes de mapear HCs impregnados em substratos minerais.

O algoritmo de classificação MTMF foi aplicado às imagens hiperespectrais ProSpecTIR. Os espectros dos pixels centralizados em cada caixa de contaminação, validados pelas bibliotecas espectrais de campo e referência, foram utilizados como *endmember* para o mapeamento dos HCs. Os resultados são apresentados na Figura 7.

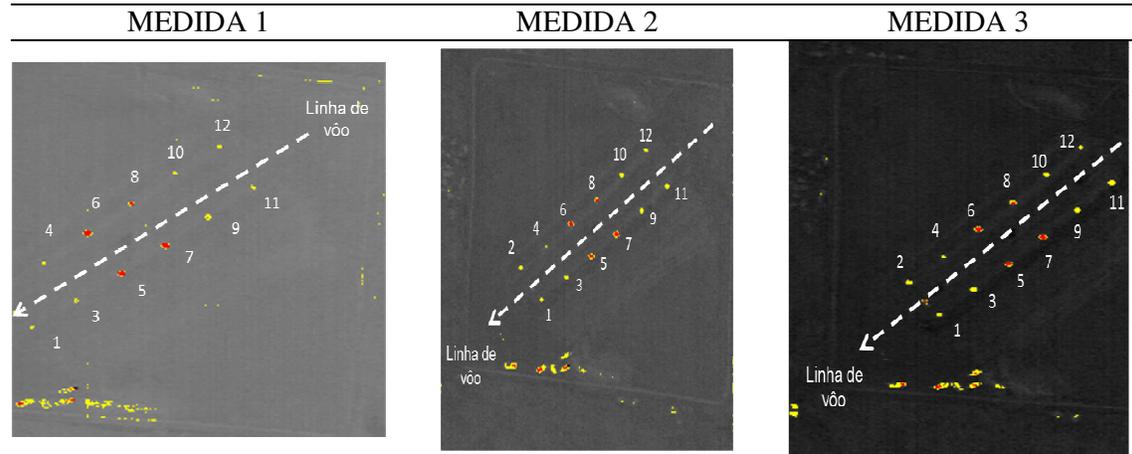


Figura 7. Mapeamento dos HCs nas imagens hiperespectrais ProSpecTIR pelo método MTMF. Os pixels coloridos em **amarelo** representam as caixas de contaminação com **solos arenosos e argilosos**. Os pixels **vermelhos** representam as caixas com **solo dolomítico**. Medida 1 = 1h; medida 2 = 30 min; medida 3 = 15 min, antes do levantamento aéreo. Os retângulos tracejados indicados nas imagens, nos quais estão contidos pixels amarelos e vermelhos distantes das caixas experimentais, correspondem à resíduos de solos contaminados e latões de HCs utilizados na contaminação. Outros pixels classificados fora da região das caixas são interpretados como falso-positivos e tendem a desaparecer na medida em que o volume de HC é incrementado na mistura com os substratos.

Nota-se na Figura 7 que foi possível identificar todas as caixas de contaminação impregnadas com HCs e ainda separar as caixas com solo dolomítico (5 a 8 – pixels vermelhos) das caixas com solos arenosos e argilosos (1 a 4 e 9 a 12 – pixels amarelos). A elevada similaridade entre os espectros extraídos da imagem hiperespectral e os espectros da biblioteca espectral de referência realçou as assinaturas dos HCs nas imagens, permitindo a identificação e diferenciação dos mesmos do *background* (regiões sem HCs). Uma vez que as medidas 1, 2 e 3 representam os levantamentos aéreos 1 hora (18 L), 30 minutos (36 L) e 15 minutos (54 L) após a adição do HC a mistura, fica claro que na medida que os HCs se mantêm sob exposição na superfície, a volatilidade dos mesmos não interfere na eficácia do método para a sua identificação remota. Nota-se ainda que à medida que aumenta a concentração dos HCs nas misturas, diminuem as regiões de falsos positivos (áreas fora das caixas) e aumenta o número de pixels realçados das áreas impregnadas, reforçando o

potencial do uso do SR hiperespectral para a caracterização quantitativa e qualitativa de HCs, bem como seu potencial como ferramenta operacional para prospecção petrolífera *onshore*.

5. Conclusão

As técnicas de espectroscopia, análise estatística multivariada e classificação MTMF aplicada a dados hiperespectrais aqui investigados demonstraram, num macro-experimento original, a possibilidade de caracterizar substratos minerais, sejam solos ou rochas, impregnados com HCs. Os resultados obtidos com a classificação não apenas enfatizam a aplicabilidade da biblioteca espectral criada por Scafutto e Souza Filho (2011) para identificação de HCs, como também confirma a viabilidade da utilização de dados aerotransportados hiperespectrais para a prospecção petrolífera em regiões continentais. O desenvolvimento desta técnica, aliada a outras ferramentas exploratórias, como a sísmica e a geoquímica, abre caminhos para descoberta de novos campos de exploração *onshore*, bem como para o monitoramento ambiental de regiões afetadas por vazamentos de dutos em sub-superfície através de uma ferramenta rápida, eficaz e de baixo custo operacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobrás pela concessão dos óleos e dados hiperespectrais utilizados nesse estudo (nas pessoas de Pedro Altoé, Lis Maria Leoni Rabaco e Renato Seixas da Rocha) e as empresas FotoTerra (Guilherme Pinho), SpecTIR (Conrad Wright, Mark Cantrell & equipe) e Aerospace (Dean Riley e equipe) pela colaboração durante a realização dos levantamentos de campo e aéreos nos Estados Unidos e pelas valiosas discussões.

Referências

- Boardman, J.W. (1998). Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved sub-pixel target unmixing and rejection of false positives: Mixture Tuned Matched Filtering. In: Proceedings of the 7th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 97-1, pp. 55. Pasadena, CA.
- Chung, H., Choi, H-J., Ku, M-S. (1999). "Rapid Identification of Petroleum Products by Near-Infrared Spectroscopy". *Bulletin of Korean Chemical Society*, vol. 20:9, pp. 1021-1025.
- Cloutis, E.A. (1989). "Spectra Reflectance Properties of Hydrocarbons: Remote Sensing Implications". *Science*, vol. 245, pp. 165-168
- Hörig, B., Kuhn, F., Oschütz, F., Lehmann, F., (2001). "HyMap Hyperspectral Remote Sensing to Detect Hydrocarbons". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22:8, pp.1413-1422.
- Lammoglia, T. & Souza Filho, C.R. (2009). "Caracterização Espectral de Petróleos de Bacias Produtoras Brasileiras". *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, p. 3235-3242.
- Sanchez, G., Roper, W.E., Gomes, R. (2003). "Detection and Monitoring of Oil Spills using Hyperspectral Imagery". *SPIE*, vol. 5097, pp. 233-240.
- Scafutto, R.D.P.M e Souza Filho, C.R. (2011). "Espectroscopia de Reflectância (VNIR-SWIR) Aplicada à Detecção e Identificação de Hidrocarbonetos em Substratos Contaminados: Uma Referência para a Caracterização de Exsudações e Vazamentos in situ a partir de Imagens de Sensoriamento Remoto Multiespectrais e Hiperespectrais". In *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, Brasil, p. 8060-8067
- Rivard, B., Lyder, D., Feng, J., Gallie, A., Cloutis, E., Dougan, P., Gonzalez, S., Cox, D. and Lipsett, M.G. (2010) "Bitumen Content Estimation of Athabasca Oil Sand from Broad Band Infrared Reflectance Spectra". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 88, pp. 830-838.
- Winkelmann, K.H., 2005, "On the Applicability of Imaging Spectrometry for the Detection and Investigation of Contaminated sites with Particular Consideration Given to the Detection of Fuel Hydrocarbon Contaminants in Soil". Tese de Doutorado. – Universidade de Cottbus – Alemanha, 236 p..