



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

VAGNEY APARECIDO AUGUSTO

PROCESSAMENTO DE IMAGENS ASTER NA DETECÇÃO DE ÁREAS COM
MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Souza Filho

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Vagney Aparecido Augusto e aprovada pela Comissão Julgadora em 29/08/2006

Carlos R. S. Filho

ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

Agosto - 2006

**Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca
do Instituto de Geociências/UNICAMP**

Augusto, Vagney Aparecido.	
Au45p	Processamento de imagens ASTER na detecção de áreas com microexsudações de hidrocarbonetos / Vagney Aparecido Augusto -- Campinas,SP.: [s.n.], 2006.
Orientador: Carlos Roberto de Souza Filho, Raimundo de Almeida Filho. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 1. Sensoriamento remoto. 2. Hidrocarbonetos. 3. São Francisco, Rio, Bacia. 4. Processamento de imagens – Técnicas digitais. I. Souza Filho, Carlos Roberto de. II. Almeida Filho, Raimundo. III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. IV. Título.	

Título em inglês: Aster imagery processing and detection of hydrocarbon.

Keywords:

- Remote sensing;
- Hydrocarbons;
- São Francisco, River, Basin
- Digital image processing.

Área de concentração: Geologia e recursos naturais.

Titulação: Mestre em geociências

Banca examinadora: - Carlos Roberto de Souza Filho;
- Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida;
- Alexandre Campana Vidal.

Data Defesa: 29/08/2006.

Programa de pós-graduação em Geociências.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

AUTOR: VAGNEY APARECIDO AUGUSTO

**PROCESSAMENTO DE IMAGENS ASTER NA DETECÇÃO DE ÁREAS COM
MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Aprovada em 29/08/2006

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Carlos Roberto de Souza Filho - Presidente

Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal

Alexandre Campana Vidal

Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

Campinas, 29 de agosto de 2006

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, me ajudaram no decorrer da minha pós-graduação, que culmina com a realização deste trabalho.

Reitero meus agradecimentos ao Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho por ter sido meu orientador (tão compreensivo) e que muito ajudou no desenvolvimento deste trabalho, bem como aos membros da banca.

Agradeço ao Dr Raimundo Almeida Filho (INPE), meu Co-Orientador, pelos ensinamentos, paciência e compreensão.

Sou Grato ao Dr. Wilson de Oliveira, pelo fornecimento de dados e acompanhamento do trabalho. Ao CNPq pelo financiamento da bolsa de mestrado.

Agradeço também a todos os professores do IG pela contribuição na minha formação profissional, conselhos e pelos ensinamentos de vida.

Aos meus amigos, que ao longo de toda minha vida me trouxeram alegrias – meu sincero obrigado! Ao pessoal do LAPIG (Cesar, Juliane, Senna, Ana Lícia, Oderson, Solange, Barata, Ingrid, Cleyton, Diego, Lucíola, Fabiane, Sebastião, Lobato, Rogério, Thais, Gustavo, Paulão, Carol, Rafael, Taty, Vicente...) pelas horas compartilhadas no laboratório.

A todos os amigos da Pos (Adalberto, Fuck, Benvenuto, Ricardinho, Tharsila, Josy, Fernandinha, Aninha, Jimena, Amante, Dutra, Sergio, Rolando, Fabrício, Willian ...) por todos momentos de alegria que vivemos neste IG.

Ao casal Senna e Paula pela companhia, ajuda, tudo e muito mais, meus sinceros agradecimentos!!!!

Muito agradecido ao Prof. Ticiano e sua esposa por terem me acolhido em sua casa por tanto tempo de forma tão generosa.

Aos meus colegas de casa (Leo, Valadão, Varvito, Fernando, Rodrigo) pela companhia e tolerância.

Especialmente a Valzinha, meu anjo da guarda em todos os momentos!!! Edinalva por velozes e graciosos atendimentos. Também Sr. Aníbal por toda atenção, assim como todos funcionários do IG.

Expresso também minha eterna gratidão à minha família, que sempre foi meu alicerce, sem o qual seria muito mais difícil superar as dificuldades.

Agradeço a Deus, por ter – tantas vezes! – ouvido e atendido aos meus pedidos!

SUMÁRIO

Agradecimento	iii
Sumário	iv
Lista de Figuras	v
Resumo	viii
Abstract	x
1.1 Introdução	1
1.2 Efeitos Superficiais Induzidos Por Hidrocarbonetos	4
1.2.1 Formação de Carbonatos	5
1.2.2 Minerais Radioativos e Magnéticos	5
1.2.3 Descoloração em Solos Avermelhados (Bleaching in Red Soils)	6
1.2.4 Alteração de Argilominerais	6
1.2.5 Anomalias Geobotânicas	7
1.3 Efeitos Superficiais Identificáveis por Sensoriamento Remoto	8
1.3.1 Carbonatos	8
1.3.2 Bleaching em Solos Vermelhos	9
1.3.3 Argilo-minerais	9
1.3.4 Anomalias Geobotânicas	9
1.4 Objetivos	11
2.0 Localização e Aspectos Geológicos da Área de Estudo	12
2.1 Aspectos do Sistema Petrolífero da Bacia	14
2.1.1 Rochas Geradoras	14
2.1.2 Rochas Reservatórios	14
2.1.3 Selo	15
3.0 Análise dos Dados Geoquímicos	16
4.0 Processamento de Imagens	20
4.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	22
4.2 Caracterização Espectral da Vegetação e Solos Afetados por Microexsudações de Hidrocarbonetos	22
4.3 Spectral Angle Mapper (SAM)	23
4.4 Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)	24
5.0 Resultados e Discussões	25
5.1 Mapeamento Espectral	30
5.2 Validação dos Resultados	35
6.0 Conclusões	36
7.0 Referências Bibliográficas	39

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01.** A: Ocorrência pontual de *microseepages* na Bacia Ventura, Califórnia-USA. B: Ocorrência de *macroseepages* fluindo na superfície, Bacia Ventura (Fonte: Noomen *et al.* 2003)._____2
- Figura 02.** Possível modelo de alterações superficiais causadas por *microseepages* acima do reservatório (modificado de Thompson *et al.* 1994)._____3
- Figura 03.** Anomalias associadas às alterações superficiais, resultantes da degradação dos HCs (modificado de Van der Werff & Lucieer, 2004)._____4
- Figura 04.** Modelo de alterações superficiais associadas a *microseepages* (modificado de Saunders *et al.* 1999)._____6
- Figura 05.** Ocorrências de *microseepages* que indiretamente alteraram a vegetação sobrejacente. Bacia Ventura, Califórnia-USA. (Fonte: Van der Werff, 2003)._____7
- Figura 06.** Curva de Reflectância de uma folha sadia (figura esquemática). _____10
- Figura 07.** Mapa de localização da área de estudo na Bacia do São Francisco, disposta na confluência dos rios Paracatu (esquerda) e São Francisco (direita) (fonte: ANP)._____13
- Figura 08.** Coluna estratigráfica do grupo Bambuí no alto e médio rio São Francisco (modificado de Alkmim *et al.* 1996)._____14
- Figura 09.** Mapa geológico simplificado do Remanso do Fogo. Modificado de Oliveira (1998). _____15
- Figura 10.** Mapa geoquímico da somatória dos HCs (HC total) e metano (C1) sobreposto ao mapa geológico. _____17
- Figura 11.** Mapa geoquímico do etano (C2) e butano (C3) sobreposto ao mapa geológico. _____18
- Figura 12.** Mapa geoquímico do propano (C4) e hexano (C6) sobreposto ao mapa geológico. _____19
- Figura 13.** Resolução espectral e espacial dos sensores ASTER e ETM+ (fonte: JPL/NASA). _____20
- Figura 14.** Curva espectral da vegetação sadia re-amostrada para as nove bandas do ASTER. _____23
- Figura 15.** Comparação das curvas espectrais da vegetação sadia e estressada. _____24
- Figura 16.** Perfis espectrais extraídos da imagem ASTER (período seco: 05/09/2000), entre a borda e o centro de uma das anomalias geoquímicas de HCs investigadas na área de estudo. (A) e (B) esses perfis são apresentados, respectivamente, em seção longitudinal e perspectiva. Espectros verdes representam a VS fora da anomalia geoquímica e espectros marrons representam a VE no centro da anomalia; outras cores representam espectros extraídos em posições intermediárias a esses dois externos. Com base nessas figuras é possível notar uma evidente e consistente variação espectral entre as zonas de borda e centro da anomalia, que é

acompanhada, conforme verificado no campo, por uma variação da cobertura vegetal (A), constituindo, portanto, numa anomalia geobotânica bem definida. Em (C), destaca-se dois espectros extraídos no centro e na borda da anomalia geoquímica/geobotânica. Note que entre a região do NIR e SWIR (bandas B3 e B4), há uma distinta inversão espectral entre o comportamento da vegetação não afetada ou menos afetada pelas microexsudações (VS, com alto de reflectância na banda B3 e baixa de reflectância relativo na B4) e a vegetação muito afetada pelos HCs (VS, com alto de reflectância na B4 e baixo de reflectância relativo na B3). Esse comportamento condiz com aquele previsto para uma vegetação sadia e sob estresse. _____ 26

Figura 17. Imagem NDVI, derivada dos dados ASTER adquiridos no período seco (05/09/2000), apresentada em pseudocor, com matiz verde. Esse produto foi preparado de forma que as matizes de verde mais claro e mais escuro, representam, respectivamente, menor e maior quantidade de biomassa. Nas duas áreas sob foco, o contorno azul marca uma ampla região onde o NDVI é mais baixo. Em maior detalhe, nota-se que nesses setores ou próximos aos mesmos, há realce de áreas aproximadamente circulares (setas vermelhas) onde os eucaliptos são pouco desenvolvidos ou ausentes. Na parte inferior da figura, são apresentadas fotos dos locais verificados no campo que validam as observações feitas a partir desse produto ASTER. _____ 27

Figura 18. Espectros de referência para áreas dentro da anomalia (vegetação estressada) e fora da anomalia de HCs (vegetação sadia), no período chuvoso (02-2001) e seco (09-2000), considerando o intervalo do espectro coberto pelas bandas VIS-SWIR (bandas 1-9) do ASTER. _____ 28

Figura 19. A: Figura 19. (A) Imagem ASTER R3G2B1 (09/2000) sobreposta às anomalias geoquímicas de todos HCs integrados. (B) e (D): Resultado da classificação SAM para vegetação estressada (VE) (em vermelho) sobreposta a imagem do NDVI (fundo, em matiz verde). Os pixels ‘anomalos’, nesse caso, foram selecionados com base no escatergrama da Figura (F), considerando não somente os menores ângulos da imagem Rule do SAM (eixo X), mas também e, simultaneamente, os menores valores de NDVI (eixo Y). (C) e (E): Resultado da classificação MTMF para VE (vermelho). Em (G) escartergrama com os valores de MF Score vs improbabilidade usados na classificação MTMF. _____ 31

Figura 20. (A) Imagem ASTER R3G2B1 (02/2001) sobreposta às anomalias geoquímicas de todos HCs integrados. (B) e (D): Resultado da classificação SAM para vegetação estressada (VE) (em vermelho) sobreposta a imagem do NDVI (fundo, em matiz verde). Os pixels

‘anomalos’, nesse caso, foram selecionados com base no escatergrama da Figura (F), considerando não somente os menores ângulos da imagem Rule do SAM (eixo X), mas também e, simultaneamente, os menores valores de NDVI (eixo Y). (C) e (E): Resultado da classificação MTMF para VE (vermelho). Em (G) escartergrama com os valores de MF Score vs improbabilidade usados na classificação MTMF. _____32

Figura 21. (A) Imagem ASTER R3G2B1 (09/2000) sobreposta às anomalias geoquímicas de todos os HCs integrados. (B) e (C) Resultado da classificação SAM para caulinita (em vermelho) sobreposta a imagem do NDVI (fundo, em matiz verde). _____35

Figura 22. (A) Área de cerrado em ponto com anomalias geoquímicas de HC, onde a vegetação é pouco desenvolvida a menos densa. (B), (C) e (D) Pontos em riachos distintos da região com presença de escapes de gases na forma de borbulhamentos na lâmina d’água. (E) Folhas de eucaliptos dentro e fora das anomalias – Folha sadia (1), folhas possivelmente com deficiência em cálcio e nitrogênio (2) e (3), com deficiência em potássio (4), com deficiência em fósforo (5) (cf. descrição baseada em análises de Oliveira 1998). (F) Juá, desenvolvido sobre anomalia de HC, com nanismo e exibindo fruto com sinais de deficiência nutricional e/ou hídrica. ____37



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**PROCESSAMENTO DE IMAGENS ASTER NA DETECÇÃO DE ÁREAS COM
MICROEXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS**

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

VAGNEY APARECIDO AUGUSTO

Escapes gasosos de hidrocarbonetos (HCs) em superfície são processos já documentados em várias partes do mundo. Os reservatórios de petróleo não são completamente selados, permitem escapes de fluidos, principalmente gases, que migram e formam microexsudações em superfície. Este processo ocorre principalmente como resultado de altas pressões diferenciais nos reservatórios. A migração ocorre de distintas formas, através de falhas, fraturas, planos de acamamentos e de rochas com alta porosidade. Os gases, quando próximos ou presentes na superfície, interagem com os solos produzindo um conjunto de alterações físico-químicas. Estas alterações provocam a dissolução e precipitação de minerais, mobilização e imobilização de elementos químicos, conseqüentemente gerando alterações fisiológicas indiretas na vegetação sobrejacente. Os principais fatores resultantes destes processos, e que influenciam o desenvolvimento da vegetação são: disponibilidade de oxigênio; concentração de CO₂; disponibilidade de metais pesados e a diminuição da porosidade dos solos. Os efeitos observados nas plantas em solos ricos em HCs são: crescimento debilitado; mudança nas estruturas das folhas, acompanhada de uma variação na coloração; quedas de folhas; menor densidade de plantas; atrofia; em casos extremos, pode ocorrer a morte da vegetação no local. Diante deste

contexto, foi feito um estudo através de imagens do sensor multiespectral ASTER/TERRA, de forma integrada com dados geoquímicos de solos, objetivando a caracterização das possíveis modificações da vegetação ao nível espectral. A área de estudo foi restrita a uma cultura de eucalipto na região de Remanso do Fogo, Município de Buritizeiro-MG, que é conhecida historicamente pela várias ocorrências de emanações gasosas naturais de HCs. Geologicamente, a área compreende sedimentos Fanerozóicos da denominada Bacia São Franciscana, incluindo siltitos, folhelhos, calcários, dolomitos, arcósios, recobertos por sedimentos elúvio-coluvionares areno-argilosos e fluviais arenosos. O processamento digital dos dados ASTER consistiu basicamente de duas etapas: (i) caracterização espectral da vegetação nas áreas com anomalia geoquímicas de gás, em conjunto com pontos já conhecidos de ocorrências de exsudações gasosas; (ii) aplicação de técnicas de mapeamento espectral comumente utilizadas em imagens hiperespectrais, denominadas SAM (Spectral Angle Mapper) e MTMF (Mixture Tuned Matched Filtering), objetivando separar áreas com ocorrências de exsudações de HCs, baseando-se nos espectros característicos identificados. A análise espectral dos pixels nas áreas anômalas possibilitou a sua diferenciação de áreas não afetadas pelas microexsudações. A partir dos espectros de referencia identificados como anômalos, observou-se modificações marcantes na reflectância da vegetação nas bandas 2, 3, 4 e 6 do ASTER, demonstrativas da associação espacial entre anomalias geoquímicas e geobotânicas. Este estudo de caso revelou o potencial das técnicas de processamento digital aplicadas à imagens do sensor ASTER, como ferramenta para a detecção e caracterização de exsudações, as quais constituem importantes indícios para ocorrência de recursos de óleo e gás.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**ASTER IMAGERY PROCESSING AND DETECTION OF
HYDROCARBON MICROSEEPS**

ABSTRACT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

VAGNEY APARECIDO AUGUSTO

Escapes of gaseous hydrocarbons (HCs) at surface (i.e., seepages) are processes recorded in several parts of the world. The reservoirs of oil are not completely sealed, allow fluid escapes, mainly gases, which migrate and form seeps at surface. This process occurs mainly as a result of highly distinguishing pressures in the reservoirs. The migration occurs by different means, through faults, fractures, bedding plans and through rocks with high porosity. The gases, when close or at surface, interact with soils producing a set of chemical alterations. These alterations provoke the dissolution and precipitation of minerals, mobilization and immobilization of chemical elements, consequently generating indirect physiological alterations in the superjacent vegetation. The main resultant factors of these processes and that influence the development of the vegetation are: oxygen availability; CO₂ concentration; availability of heavy metals and the reduction of the ground porosity. The effects observed in the plants in HCs-rich soils are: weak growth; change in leaf structure followed by a variation in their color; leaf fall; lesser density of plants, which are generally atrophied; and in extreme cases, the death of the vegetation may occur. In this context, this study comprises the integrated use of multispectral images of the ASTER/Terra sensor/satellite and HCs geochemical data, aiming the characterization of possible spectral modifications of vegetation affected by seepages that could be traced by remote sensing techniques. The study area is restricted to a culture of eucalyptus in the region of Remanso do Fogo, City of Buritizeiro-MG, that is known historically by various occurrences of natural gaseous emanations of HCs. Geologically, the area comprises Phanerozoic sediments of the Sao Francisco Basin, including siltstones, black-shale, limestones, dolomites, arkoses, which in turn

are covered by areno-argillaceous colluviums and arenaceous fluvial sediments. ASTER data digital image processing involved basically two steps: (i) spectral characterization of the vegetation in geochemically anomalous areas and where occurrences of seepages are known; (ii) application of spectral mapping techniques usually applied to hyperspectral data, such as SAM (Spectral Angle Mapper) and MTMF (Mixture Tuned Matched Filtering), aiming to map sectors with occurrences of seepages, based on their distinctive spectral signature. The spectral analysis of pixels in the anomalous areas made possible the differentiation between areas affected and not affected by the seepages. Steaming from the identified anomalous reference spectra, important modifications were observed in the reflectance of the vegetation in ASTER bands 2, 3, 4 and 6, which were demonstrative of the spatial association between geochemical and geobotanical anomalies in the area. This study case discloses the potential of ASTER data, modelled spectra and the applied image processing techniques, as tools for the detection and characterization of seepages, which constitute an important indication for occurrence of resources of oil and gas.

1.0 INTRODUÇÃO

Exsudações de hidrocarbonetos (HCs) em superfície são processos já documentados em várias partes do mundo (Jones & Drozd, 1983), nas formas líquida e gasosa, em ambientes marinhos e continentais. Os reservatórios de petróleo não são completamente selados e permitem escape de fluidos, principalmente gases que, por processos de migração vertical a sub-vertical, exalam em superfície formando exsudações denominadas na literatura como *seepages*. Este é subdividido, quanto a sua forma de ocorrência, em *macroseepages* e *microseepages*.

Os *seepages* têm um papel importante na exploração de novas bacias petrolíferas (Hunt, 1996). A importância destas exsudações foi fortemente minimizada nesta última década, principalmente devido ao uso de geofísica, geoquímica, entre outras técnicas indiretas. Não obstante, quase todas as regiões produtoras importantes do mundo foram descobertas primeiramente pela detecção de óleo e/ou gás em superfície (Hunt, 1981).

Seepages ocorrem onde exista um caminho permeável que possa conduzir escapes de petróleo dos reservatórios à superfície. Estes caminhos incluem os poros de camadas portadoras de petróleo, inconformidades estratigráficas das rochas fonte, reservatórios rompidos, intrusões de domos salinos (Link, 1952). A migração de hidrocarbonetos para superfície provoca alterações diagenéticas na composição mineralógica dos estratos sobrejacentes aos depósitos.

Os hidrocarbonetos leves (C1-C4 - metano, etano, propano, butano e pentanos) migram para superfície, em geral, na forma de gás, formando os *microseepages* (Figura 01-A). Alguns HCs mais pesados (>C5) migram na fase líquida, formando os *macroseepages* (Figura 01-B). Nestes casos eles escoam somente onde há um trajeto livre, com permeabilidade adequada para transportar líquidos à superfície.

Os HCs gasosos leves são mais móveis em sub-superfície e requerem muito menos espaços abertos para atingir a superfície. Como o processo de migração gasosa em geral é vertical, as anomalias gasométricas em superfície tendem a ocorrer sobrejacentes aos reservatórios dos quais se originam, aumentando assim seu significado prospectivo.

Os *microseepages* podem ser detectáveis por análises geoquímicas e, em alguns casos, através de sensoriamento remoto. A detecção destes *seepages* pode ser combinada com informações geológicas e geofísicas para a avaliação de áreas com maior probabilidade de conter reservatórios.

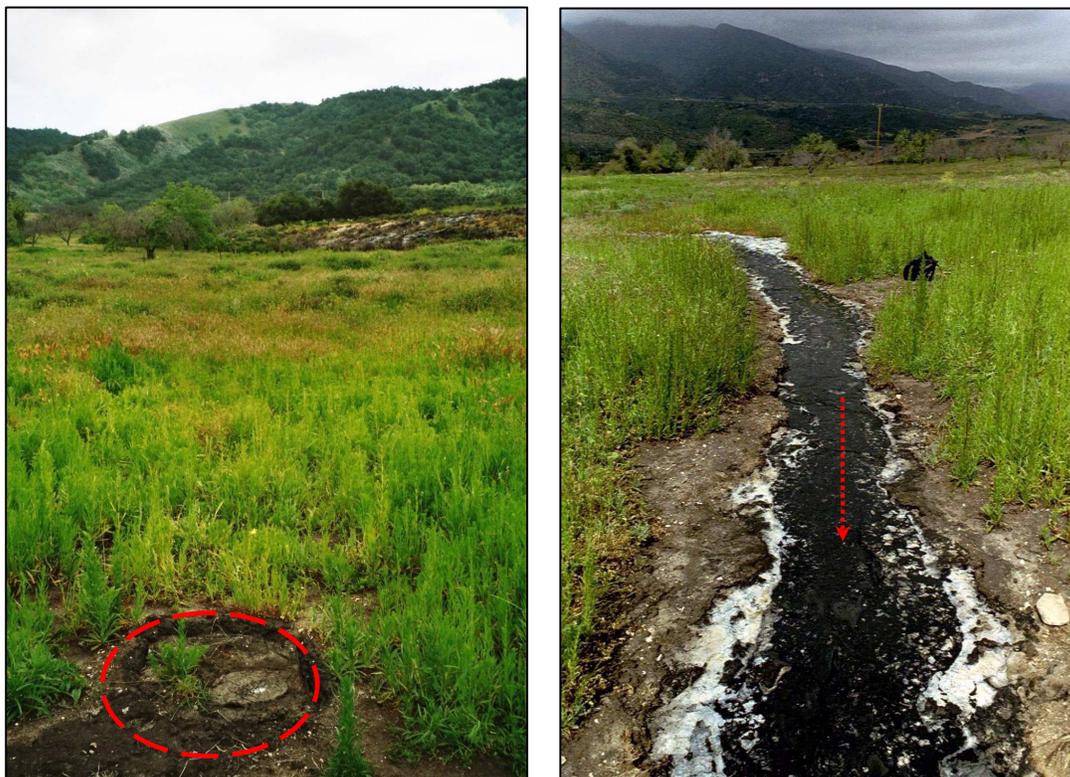
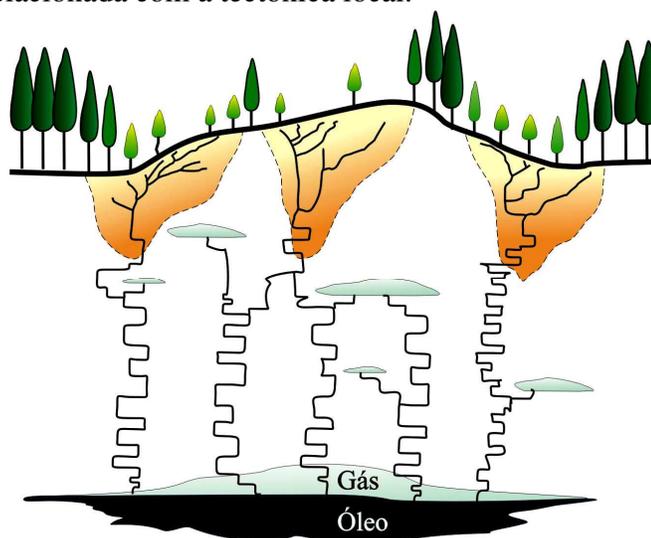


Figura 01. A: Ocorrência pontual de *microseepages* na Bacia Ventura, Califórnia-USA. **B:** Ocorrência de *macroseepages* fluindo em superfície, Bacia Ventura (Fonte: Noomen *et al.* 2003).

O processo e os efeitos de escape de HCs dos reservatórios foram temas de debates por vários anos desde a década de 50, porém ainda não se conhece completamente a forma como esse processo ocorre em sub-superfície e suas alterações na superfície. Alguns autores, entre os quais Schumacher (1996), Tompsom *et al.* (1998), Saunders *et al.* (1999) e Van der Meer *et al.* (2002); criaram modelos para representar os efeitos e os possíveis processos associados aos *seepages*. Esses modelos são baseados em alterações relacionadas a microexsudações superficiais. Tompsom *et al.* (1994) relatam que os HCs escapam dos reservatórios e alcançam a superfície por meio de falhas, juntas e acamamentos na configuração de uma rede de espaços vazios interconectados (Figura 02). Estes HCs migram em forma de bolhas associados a águas subterrâneas (colóides), movimentando-se com velocidade da ordem de mm/s. Ainda segundo Tompsom *et al.* (1994), parece haver uma consistente relação quanto à presença de *seepages* e áreas tectonicamente ativas. Thrasher *et al.* (1996) relata que a ocorrência de *seepages* é

relacionada à pressão dos gases e óleos nos reservatórios, à pressão hidrostática e às mudanças no estresse litosférico, estando diretamente relacionada com a tectônica local.

Figura 02. Possível modelo de alterações superficiais causadas por *microseepages* acima do reservatório, (modificado de Thompson *et al.* 1994).



De acordo com Van der Meer *et al.* (2002), o escape dos HCs ocorre principalmente por três processos: i) efusão de gases de forma livre, resultante de altas pressões diferenciais nos reservatórios; ii) difusão de gases normalmente dissolvidos na água, que migram verticalmente através de rochas porosas; iii) ou movimento vertical de HCs de baixo peso molecular que, por diferença de potencial químico e/ou potencial hidrodinâmico, dissolve-se na água e movimentam-se em direção à superfície. Estes mecanismos favorecem a migração de HCs através de falhas, fraturas, planos de acamamentos e através de rochas porosas, propiciando assim que esses fluidos alcancem a superfície. Estes fenômenos de exsudações ocorrem de forma variável no tempo, mais intensos no início do processo, decaindo com o passar do tempo, até ausência de escapes em casos extremos, devido o escape total dos gases presentes nos reservatórios (Van der Meer *et al.* , 2002).

A interação de HCs com o material sobrejacente ao reservatório pode produzir uma ampla variedade de alterações diagenéticas, propiciando o aparecimento de uma assembléia mineralógica particular (Almeida Filho, 1998). Em superfície, uma série de alterações se manifestam em respostas à presença de HCs (Figura 02, 03 e 04), entre as quais: mudanças na coloração, morfologia e mineralogia dos solos, aumento da concentração de HCs gasosos (metano, propano, etano e pentano) nos solos, degradação da vegetação.

1.2 EFEITOS SUPERFICIAIS INDUZIDOS POR HIDROCARBONETOS

Mudanças mineralógicas associadas *seepages* foram reconhecidas desde as primeiras explorações de petróleo no mundo. Muitos exploradores no passado correlacionaram áreas produtivas de *seepages* com águas sulfurosas ou salinas, mineralizações e altos topográficos (Schumacher, 1996). Harris (1908), *apud* Schumacher (1996), fez a primeira descrição de pirita e outros sulfetos associados a domos salinos em camadas acima de reservatórios no campo de Louisiana (EUA). Em Oklahoma, no ano de 1922, foi observada uma descoloração em arenitos e uma notável cimentação por carbonato de cálcio. No Iraque, em 1936, pirita e sulfetos foram associados às acumulações petrolíferas. Em 1940, foi descrita a ocorrência de mineralizações secundárias de solos carbonáticos, *caliche* e silicificação em um campo no Texas-EUA. Já em 1957, demonstrou-se que a presença de sulfetos em rochas capeadoras de reservatórios na costa do Golfo (EUA) era resultante da degradação bacteriológica de hidrocarbonetos (Schumacher, 1996).

Estudos mostram que hidrocarbonetos, uma vez em superfície ou próximo à mesma, passam por degradação bacteriológica. Essas alterações já foram observadas em profundidades de até 4.200 metros em reservatórios de petróleo (Van der Meer *et al.* 2002). A degradação (oxidação) bacteriológica de HCs leves, direta ou indiretamente, pode trazer mudanças significativas nos valores de pH e Eh do ambiente, gerando influências na estabilidade de minerais, das reações e elementos químicos. Nesse ambiente, anomalias redutoras locais podem ser constituídas, favorecendo o desenvolvimento de numerosas mudanças químicas e mineralógicas, afetando solos e sedimentos sobrejacentes aos reservatórios (Schumacher, 1996).

Dentre as alterações superficiais encontradas sobre os reservatórios, têm-se (Figura 03):

- Formação de carbonatos, pirita, uraninita, elementos sulfurosos, íons magnéticos, óxidos;

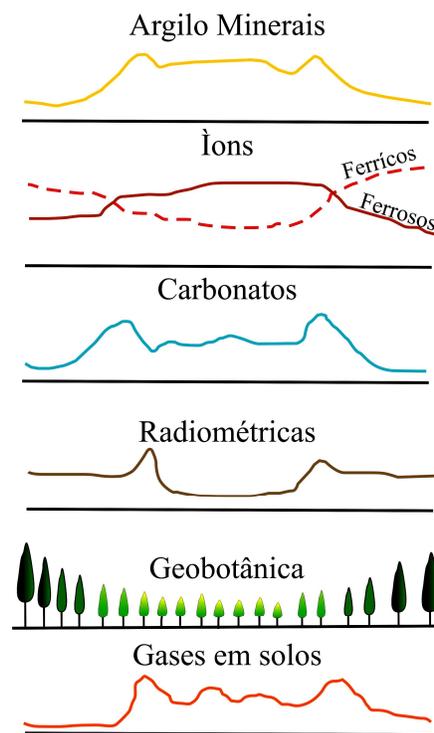


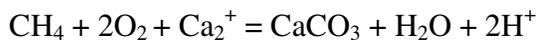
Figura 03. Anomalias associadas às alterações superficiais, resultantes da degradação dos Hcs. (Modificado de Van der Werff & Lucieer, 2004).

-
- Redução do ferro férrico e alterações de argilo-minerais;
 - Anomalias radiométricas;
 - Anomalias geomórficas;
 - Anomalias de HCs adsorvidos em solos e carbonatos ferrosos (e.g., siderita);
 - Anomalias geobotânicas.

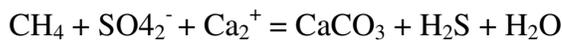
1.2.1 Formação de Carbonatos

Os carbonatos diagenéticos, na forma de cimento, são alterações mais comuns e associadas aos campos de petróleo, sendo a calcita o mineral mais freqüente. Estes carbonatos são formados principalmente por oxidação do petróleo, particularmente a partir do metano. Isso ocorre através de duas possíveis reações em diferentes ambientes (Schumacher, 1996):

(i) aeróbico:



(ii) anaeróbico:



Quando estas reações ocorrem, o dióxido de carbono reage com água para produzir bicarbonato. Este se associa com Ca e Mg em águas subterrâneas, precipitando o carbonato na forma de calcita ou dolomita, às vezes rica em Mn e Mg. Tais processos geram endurecimento do solo (cimentação), permitindo erosão diferencial, o que favorece a preservação do local, com formação de anomalias geomorfológicas (relevo elevado no local) (Thompson *et al.* 1994; Saunders *et al.* 1999) (Figuras 02 e 04). Em áreas acima de acumulações de petróleo também foram encontradas altas concentrações de carbonatos ferrosos (siderita), com HCs adsorvidos em quantidades anômalas (Schumacher, 1996).

1.2.2 Minerais Radioativos e Magnéticos

O ambiente redutor criado próximo à superfície pode levar ainda à formação, mobilização e concentração de minerais radioativos e de óxidos e sulfetos magnéticos, como pirita e magnetita. Anomalias magnéticas foram encontradas sobre os reservatórios de óleo, e foram atribuídas a reações de sulfetos de hidrogênio com óxidos (goetita), produzindo magnetita como pseudomorfo de hematita, além de sulfetos como pirrotita e greigita. Soluções ácidas também podem modificar o potássio para outros isótopos radioativos em argilominerais (ilita em solos),

gerando anomalias de baixo potássio Schumacher (1996). O ambiente redutor gerado pelas bactérias também favorece a precipitação do mineral de urânio (uraninita), antes instável no meio. Em Oklahoma (EUA), sobre os reservatórios de petróleo, existe um depósito de urânio economicamente viável, que acredita-se ter sido formado por processos de precipitação, ocasionada pelo ambiente redutor resultante da degradação dos HCs (Schumacher 1996).

1.2.3 Descoloração em Solos Avermelhados (*Bleaching in red Soils*)

Também por ação de soluções ácidas, os íons férricos presentes na hematita, goetita e outros minerais limoníticos, são alterados para íons ferrosos, resultando na perda da coloração avermelhada dos solos e rochas (*bleaching*) (Van der Meer *et al.* 2002). Os possíveis agentes responsáveis pela geração de um ambiente redutor sobre os reservatórios são os H₂S e CO₂, que podem causar estas alterações. Estes gases são resultantes da degradação química e bacteriológica dos hidrocarbonetos (cf. na Figura 04).

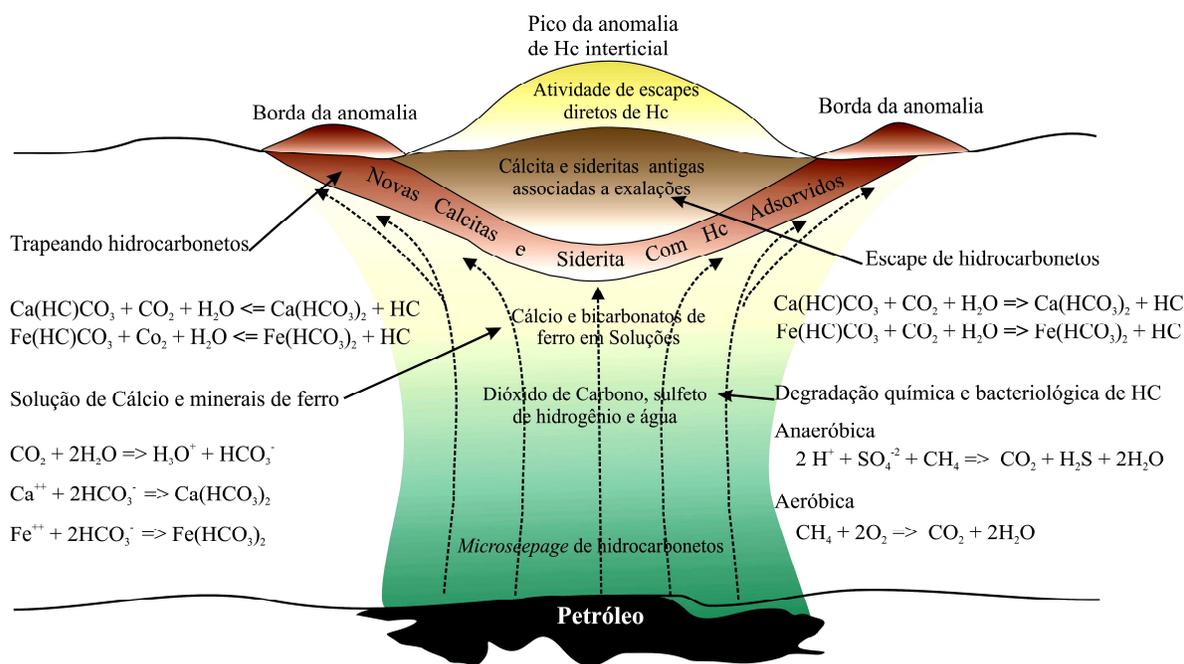


Figura 04. Modelo de alterações superficiais associadas a *microseepages* (modificado de Saunders *et al.* 1999).

1.2.4 Alteração de Argilominerais

O CO₂, H₂S e ácidos orgânicos, produzidos como resultado da oxidação microbiológica em HCs, podem gerar ainda um ambiente redutor e condições ácidas que promovem a alteração

de feldspatos para argilas e convertem argilominerais como illita e esmectitas para caulinitas, desenvolvendo zonas com concentrações anômalas de caulinita no local (Schumacher 1996).

1.2.5 Anomalias Geobotânicas

A degradação de hidrocarbonetos (oxidação) gera um grande consumo de oxigênio, causando uma diminuição do oxigênio disponível nos solos e aumento da quantidade de CO₂ e ácidos orgânicos. Estas mudanças podem modificar o pH e o Eh dos solos, afetando a solubilidade de elementos traços e, conseqüentemente, a disponibilidade destes para as plantas. Estudos das interações sofridas pela vegetação em locais com exsudação demonstram que hidrocarbonetos são tóxicos para plantas em concentrações muito altas, mas também causam degradação das mesmas em baixas concentrações. Os fatores mais importantes que influenciam o desenvolvimento da vegetação são: disponibilidade de oxigênio, concentração de CO₂, disponibilidade de metais pesados e diminuição do potencial da porosidade dos solos devido à cimentação carbonática (Flower *et al.* 1981, *apud* Oliveira, 1998). Os principais efeitos nas plantas em solos ricos em hidrocarbonetos são: crescimento debilitado, mudança nas estruturas das folhas (acompanhada de degradação das clorofilas, resultando em variação da coloração), quedas de folhas e menor densidade de plantas (em geral atrofiadas), podendo, em casos extremos, ocorrer a morte da vegetação no local (Figura 02 e 05) (Oliveira, 1998).



Figura 05. Ocorrências de *microseepages* que indiretamente alteraram a vegetação subjacente. Bacia Ventura, Califórnia-USA. (Fonte: Van der Werff, 2003).

Estas alterações superficiais de HCs supracitadas permitiram o desenvolvimento de várias técnicas de exploração para campos petrolíferos, desde métodos geoquímicos e geofísicos, mas também de sensoriamento remoto (SR), foco deste trabalho.

A detecção de *seepages* por SR pode ser de duas formas: direta e indireta. A primeira é efetuada por meio de localização de óleo aflorante (associados os *macroseepages*). A segunda é realizada a partir de anomalias geobotânicas ou minerais de alteração normalmente associados aos *microseepages*.

A maioria dos dados de sensoriamento remoto usados para exploração de HCs no passado foram fotografias aéreas, imagens de radar, Landsat (TM-MSS) e *Scanner* aerotransportado. As fotografias aéreas têm sido usadas desde 1930 para análise estrutural e estratigráfica. Porém, a partir da década de 70, os satélites da série Landsat passaram a observar a superfície terrestre sistematicamente, proporcionando a possibilidade de detecção de óleo em bacias continentais e oceânicas.

1.3 EFEITOS SUPERFICIAIS IDENTIFICÁVEIS POR SENSORIAMENTO REMOTO

Aplicações de SR na exploração petrolífera objetivam a caracterização dos seguintes fenômenos: redução de íons férricos (bleaching), conversão de argilas e feldspatos para caulinita, cimentação por carbonato, formação de calcita/siderita, e anomalias espectrais de vegetação estressada, além da detecção direta de óleo em superfície. A seguir, são relatadas experiências de sucesso na detecção desses fenômenos por SR.

1.3.1 Carbonatos

O uso de SR no campo petrolífero da bacia de Junggar (China) permitiu a detecção de um aumento na quantidade total de carbonato no solo. Esse estudo foi realizado através de um sensor aerotransportado contendo 4 canais com a seguinte cobertura espectral: 1,550-1,650 μm , 1,985-2,085 μm , 2,037-2,137 μm e 2,039-2,193 μm . O espectro mais comum identificado foi o da calcita, com feições de absorção centradas em 1,8 μm , 2,0 μm , 2,16 μm , 2,35 μm e 2,55 μm (Van der Meer et al. 2002).

1.3.2 Bleaching em solos vermelhos

Segel et al. (1986), a partir de dados geológicos, geoquímicos e do sensor Landsat-TM, conseguiu identificar alterações superficiais do tipo bleaching em arenitos posicionados sobre os reservatórios do campo de petróleo Lisbom Valley (EUA). Razões entre as bandas TM2 e TM3 foram utilizadas com intuito de delinear variações do íon férrico.

1.3.3 Argilominerais

Segel et al. (1986), também no campo de Lisbom Valley, demonstraram a presença de caulinita em quantidades até cinco vezes superiores no centro da área anômala em relação à áreas mais distantes e inalteradas, dominadas por plagioclásio e micas. A ocorrência de caulinita foi primariamente detectada através de dados Landsat TM , a partir da razão das bandas TM 5 e TM7.

1.3.4 Anomalias Geobotânicas

A resposta espectral da vegetação verde é muito característica (Fig. 6), pouco variando de espécie para espécie (Meneses et al. 2001). Na região do visível (VIS : 0,4 a 0,7 μm), de domínio dos pigmentos foliares, a reflectância das plantas é genericamente baixa (5-15%); as feições de absorção ocorrem devido à presença de pigmentos fotossintéticos como clorofilas ('a' e 'b') e carotenóides (que compõem o ciclo da xantofila -pigmento amarelo), além de outros pigmentos como a antocianina, que é dependente do pH (cor-de-rosa, púrpura ou vermelho). Os carotenóides são mais abundantes na fase de senescência da planta; as antocianinas ocorrem em praticamente todas as fases, da juventude a senescência. A região do infravermelho próximo (NIR : 0,7-1,3 μm) é aquela onde os pigmentos foliares são transparentes. No NIR: (i) a radiação eletromagnética é refletida ou transmitida e a absorção é mínima (<10%); (ii) a água infrafoliar não produz bandas de absorção intensa; (iii) a $\sim 0,7 \mu\text{m}$, a reflectância passa de 5% a >50%, na zona conhecida como borda vermelha (ou red edge); (iv) nas folhas delgadas e compactas a transmitância é maior que a reflectância, ao passo que nas folhas espessas a reflectância é muito maior que a transmitância; (v) folhas secas (sem pigmento e água) têm reflectância de $\sim 80\%$ nessa faixa. (vi) as variações de reflectância nessa região são controladas pela estrutura anatômica da folha. A região do infra-vermelho de ondas curtas (SWIR – 1,3-2,5 μm) é marcada por feições relacionadas ao domínio da água na estrutura foliar da planta, com bandas de absorção centradas em 1,45 μm e 1,95 μm e a partir de 2,5 μm , alternados a máximos de reflectância, centrados em 1,65 μm e 2,2 μm . No SWIR ocorrem as feições de absorção dos compostos bioquímicos

lignina, celulose, amido, proteínas, açúcares, cuja detecção é dificultada pela origem de suas feições de absorção: a ligação O-H.

Dentre os fatores que podem afetar as propriedades espectrais das folhas, os principais são: idade; estrutura anatômica; teor em água; ataques parasitários; deficiências minerais; estresse por toxicidade química. As deficiências minerais e a toxicidade química são as principais causadoras das anomalias geobotânicas, que por sua vez são acompanhadas por mudanças no comportamento espectral das plantas. As deficiências minerais afetam primeiro o teor de clorofila e, em seguida, a estrutura anatômica, sendo comum a incidência de clorose por carência em Fe. A toxicidade química pode produzir senescência precoce e rebrota tardia; toxicidade sazonal; variação na estrutura da cobertura vegetal; gigantismo e nanismo; clorose; deslocamento no red edge (blue shift); e o deslocamento da máxima reflectância da vegetação no visível verde em direção ao visível vermelho (red shift). As deficiências minerais somadas à toxicidade química podem afetar o comportamento espectral da vegetação nas regiões do visível, infravermelho próximo e de ondas curtas. Embora a reflectância da vegetação esteja condicionada à forte absorção causada pela água no infravermelho de ondas curtas, Ripple (1986) verificou que folhas sob estresse hídrico apresentam reflectância maior no visível, menor no infravermelho próximo e maior no infravermelho de ondas curtas.

A detecção das condições de estresse na vegetação se baseia também na redução da área foliar total exposta ao sensor (dossel). Essa redução pode surgir da perda direta de folhas, da mudança de sua orientação ou da interrupção de crescimento da planta. Nestes casos, a reflectância tende a ser alterada no infravermelho próximo, por causa da redução do mecanismo de camadas (soma da energia refletida das folhas inferiores e do topo) ou por um aumento da exposição do solo (Valeriano, 2003).

Van der Meer et al. (2002) analisaram campos de petróleo da Califórnia (EUA) com sensores hiperespectrais (228 canais), no intervalo de 0,43-0,805 μ m. Essa pesquisa revelou que há mudanças espectrais expressivas relacionadas ao estresse das plantas posicionadas sobre os reservatórios conhecidos e sob influência de micro-exsudações, dentre as quais: decréscimo na porcentagem da reflectância máxima no platô do infravermelho próximo, devido aos danos impostos à estrutura das folhas; aumento da reflectância no ponto de absorção máxima da clorofila devido à redução desse componente na planta; e mudança da posição do red edge em direção à comprimentos de onda mais curtos.

Nos Apalaches (EUA), Lang et al. (1985) observaram a presença anômala de árvores do tipo bordo sobre áreas com seepages, contrastando com a floresta local, rica em carvalhos. O bordo foi encontrado sobre os pontos com máximos de exalações de metano e mínima quantidade de oxigênio nos solos, constituindo em um biomarcador preciso dessas ocorrências, detectável por dados de SR.

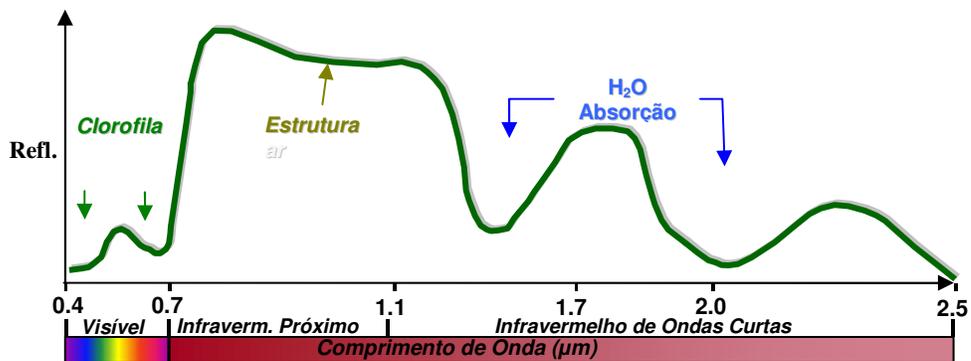


Figura 06. Curva de Reflectância de uma folha sadia (figura esquemática).

1.4 OBJETIVOS

Considerando a fundamentação descrita em epígrafe, este trabalho objetivou a caracterização espectral da vegetação sobrejacente a uma porção da Bacia do São Francisco, particularmente em locais onde fenômenos de micro-exsudações foram previamente reconhecidos, visando relacionar áreas ricas em HCs à possíveis anomalias geobotânicas. O estudo foi realizado a partir do processamento de imagens multiespectrais, temporais do sensor ASTER/TERRA e dados geoquímicos de hidrocarbonetos. Os resultados foram validados através de observações de campo.

2.0 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se próxima ao encontro dos rios São Francisco e Paracatu (Figura 07), nas imediações da localidade Cachoeira do Manteiga, Município de Buritizeiro (MG). É delimitada pelas coordenadas 16° 30' – 16° 45' de latitude sul e 45° 00' – 45° 15' de longitude oeste. Esta área é conhecida como Remanso do Fogo por apresentar numerosas emanções naturais de hidrocarbonetos.

A área abrange rochas do Grupo Bambuí, que por sua vez faz parte da Bacia do São Francisco. Esta bacia intracratônica é preenchida por unidades sedimentares mais jovens que 1.8 Ga, de complexa história geológica. Seus limites oeste e leste coincidem com os limites do Cráton São Francisco. A nordeste, é balizada pelo corredor de deformação do Paramirim e, a sul, seu limite é erosional (Alkmim et al. 1993). Tem como principais unidades de preenchimento, da base para o topo, os Supergrupos Espinhaço e São Francisco, de idades, respectivamente, Paleo/Mesoproterozóica e Neoproterozóica, além do Grupo Santa Fé, Permo-Carbonífero e os grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia do Cretáceo (Alkmim & Martins-Neto 2001). Do ponto de vista estrutural, envolve dois cinturões de antepaís de vergências opostas, correspondentes às zonas externas das faixas Brasília, Rio Preto e Araçuaí, além do compartimento central onde a cobertura pré-cambriana está indeformada (Alkmim & Martins-Neto 2001).

Na região de Remanso do Fogo, afloram sedimentos do Grupo Bambuí, pertencente ao Supergrupo São Francisco. A estratigrafia deste Supergrupo engloba duas unidades neoproterozóicas: o Grupo Macaúbas, na base, e o Grupo Bambuí, no topo. O Grupo Macaúbas compreende sedimentos glácio-continentais proximais e distais, compostos por uma associação de diamictitos, arenitos e pelitos. O Grupo Bambuí é composto pelas Formações Samburá (conglomerado, pelitos), Sete Lagoas (margas, calcilitos, calcarenitos, biolitos), Serra de Santa Helena (pelitos), Lagoa do Jacaré (calcarenitos, pelitos), Serra da Saudade (pelitos) e Três Marias (pelitos, arenitos) (Figura 08) (Alkmim & Martins-Neto 2001).



Figura 07. Mapa de localização da área de estudo na Bacia do São Francisco. Disposta na confluência dos rios Paracatu (esquerda) e São Francisco (direita) (ANP).



Na área de estudo, os sedimentos do Grupo Bambuí estão cobertos por depósitos fluviais arenosos, com lentes de silte, argila e cascalho (depósitos aluvionares), e depósitos elúvio-coluvionares areno-argilosos, com conglomerado em níveis basais (Figura 09) (Oliveira, 1998).

Localmente, os estratos do Grupo Bambuí apresentam-se suavemente dobrados, configurando sinclinais e anticlinais de grandes amplitudes (Oliveira 1998). Este autor relata ainda que interpretações sísmicas levantadas na década de 90 indicam presença de falhas normais e inversas atravessando a seqüência. Tais falhas, mostram, em superfície, relação com feições fisiográficas na região, condicionando trechos do Rio Paracatu e parte das drenagens secundárias. Oliveira (1998) afirma que as evidências sísmicas de falhas indicam que estes planos funcionam como caminhos preferenciais de migração dos gases em direção a superfície, o que explica os seepages de HCs verificados na região.

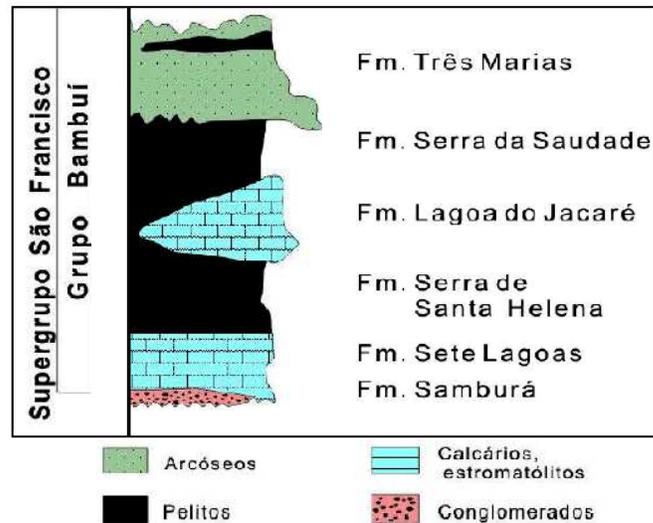


Figura 08. Coluna estratigráfica do grupo Bambuí no alto e médio rio São Francisco. Modificado de Alkmim *et al.* (1996).

2.1. Aspectos do Sistema Petrolífero da Bacia

2.1.1 Rochas geradoras

Análises em rochas do Grupo Bambuí em alguns pontos da bacia mostraram níveis muito ricos em matéria orgânica, compostas por algas e microorganismos, com teores médios superiores aos melhores geradores comprovados em outras bacias produtoras brasileiras. A posição estratigráfica exata desses níveis mais ricos não está bem definida, podendo estar situados na base do Bambuí. Níveis de folhelho e siltito pretos, ricos em matéria orgânica, ocorrem tanto na Formação Sete Lagoas com na Lagoa do Jacaré. Além dos folhelhos e siltitos, acredita-se que os calcários estromatolíticos também possuem níveis ricos em matéria orgânica, podendo ser rochas geradoras desta bacia (Pinto & Martins-Neto 2001).

2.1.2 Rochas Reservatórios

Varias rochas desta bacia têm sido sugeridas na literatura como possíveis reservatórios (ie., rochas porosas com capacidade de armazenar líquidos e gases). Diante dos estudos realizados por Pinto & Martins-Neto (2001), dois tipos de reservatórios foram definidos: carbonatos do Bambuí, em especial a Formação Sete Lagoas, e silicatos grosseiros do Grupo Macaúbas. Estes reservatórios, até o momento, têm mostrado, em geral, baixa porosidade, com baixa permeabilidade, indicando uma predominância para reservatórios fraturados (porosidade secundária) (Pinto & Martins-Neto 2001). Toledo et al. (1998), reconheceram três tipos de porosidades secundárias afetando esses reservatórios: carbonatos fraturados, carbonatos

dolomitizados e arenitos fraturados. As fraturas são predominantemente sub-horizontais e a elas se relacionam os melhores indícios de gases observados até o presente (Pinto & Martins-Neto 2001).

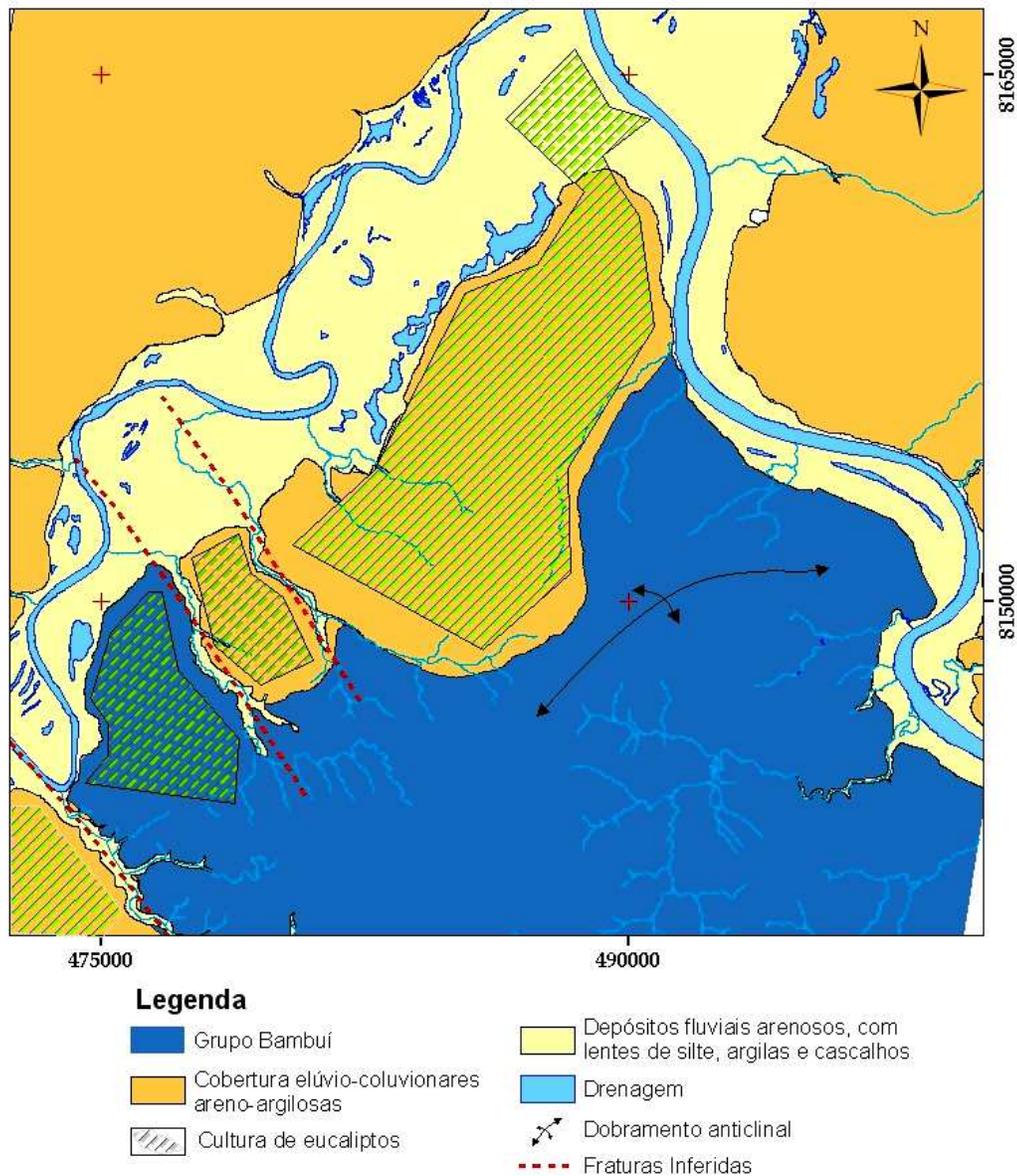


Figura 09. Mapa geológico simplificado do Remanso do Fogo. Modificado de Oliveira (1998).

A partir de informações obtidas em poços (Pinto & Martins-Neto 2001), espessas seções de folhelhos ocorrem no Bambuí e poderiam funcionar como selos (ie. rocha impermeável a líquidos ou gases). Esses folhelhos estão contidos principalmente nas Formações Serra da Saudade e Santa Helena, que recobrem as Formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas,

respectivamente. Também deve-se considerar a possibilidade de selo por pelitos da Formação Urucuia, na parte norte central e do Grupo Areado (argilítos, folhelhos) na parte sul da bacia (Pinto & Martins-Neto 2001), ambos de idade mesozóica.

3.0. ANÁLISES DOS DADOS GEOQUÍMICOS

Os dados geoquímicos utilizados nesse estudo foram derivados de análises de cromatografia gasosa em amostras de solos, coletadas durante um levantamento de superfície, executado pela equipe de exploração da Petrobrás, em 1987. Estas análises tiveram como objetivo identificar as concentrações superficiais de hidrocarbonetos (HC) gasosos leves como metano, etano, propano, butano, pentano, hexano (C1, C2, C3, C4, C5 e C6). Este levantamento também teve como meta avaliar as ocorrências naturais de gases de HC na região de Remanso do Fogo. Foram coletadas 566 amostras de solos, em profundidade de 1m, em vias vicinais de fácil acesso, sendo restrita a estradas e carreadores ao longo das plantações de eucalipto na área de estudo (Oliveira 1998).

A análise dos dados geoquímicos teve como objetivo a separação de anomalias do background regional para os diversos tipos de HCs mensurados, e conseqüente delimitação dos locais com maiores concentrações de exsudações na superfície. Estas foram definidas do seguinte modo: (i) background, valores \leq media; (ii) anomalias de 1ª ordem = media + 1 desvio padrão; (iii) anomalias de 2ª ordem = media + 2 desvio padrão; (iv) anomalias de 3ª ordem \geq media + 3 desvio padrão.

Dessa forma, foram obtidos mapas de concentração para cada composto, ou seja, mapas dos C1, C2, C3, C4, C5, C6, além do HC total. As áreas indicadas como anômalas foram sobrepostas ao mapa geológico (Figuras 10, 11 e 12), constatando-se sua relação espacial com contatos litoestratigráficos e fraturas. - ou seja, são próximas ou coincidentes às drenagens controladas estruturalmente e fraturas mapeadas dentro do contexto estrutural regional.

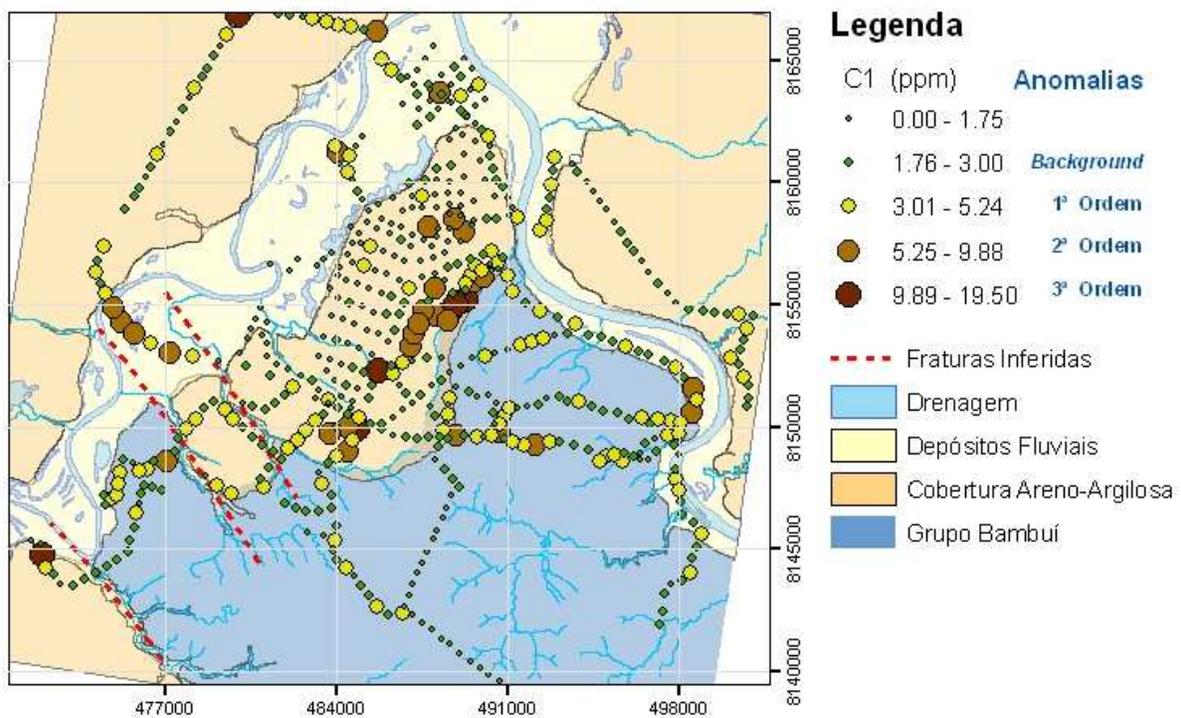
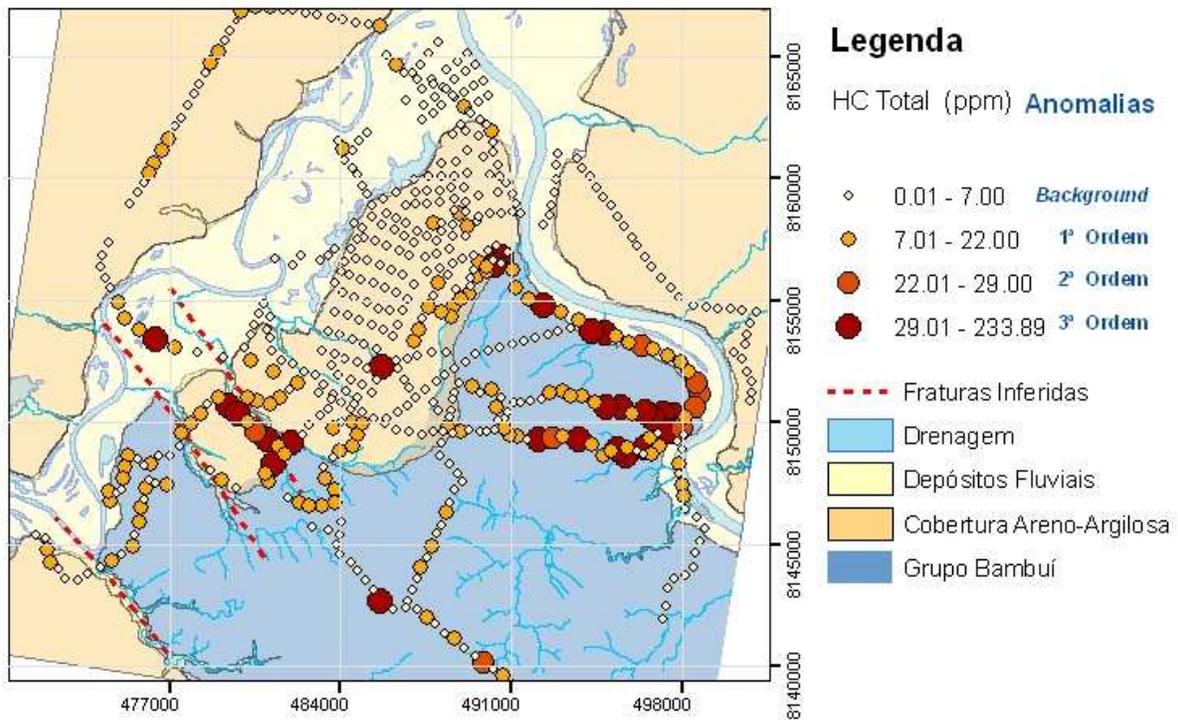


Figura 10. Mapa geoquímico da somatória dos HCs (HC total) e metano (C1) sobreposto ao mapa geológico.

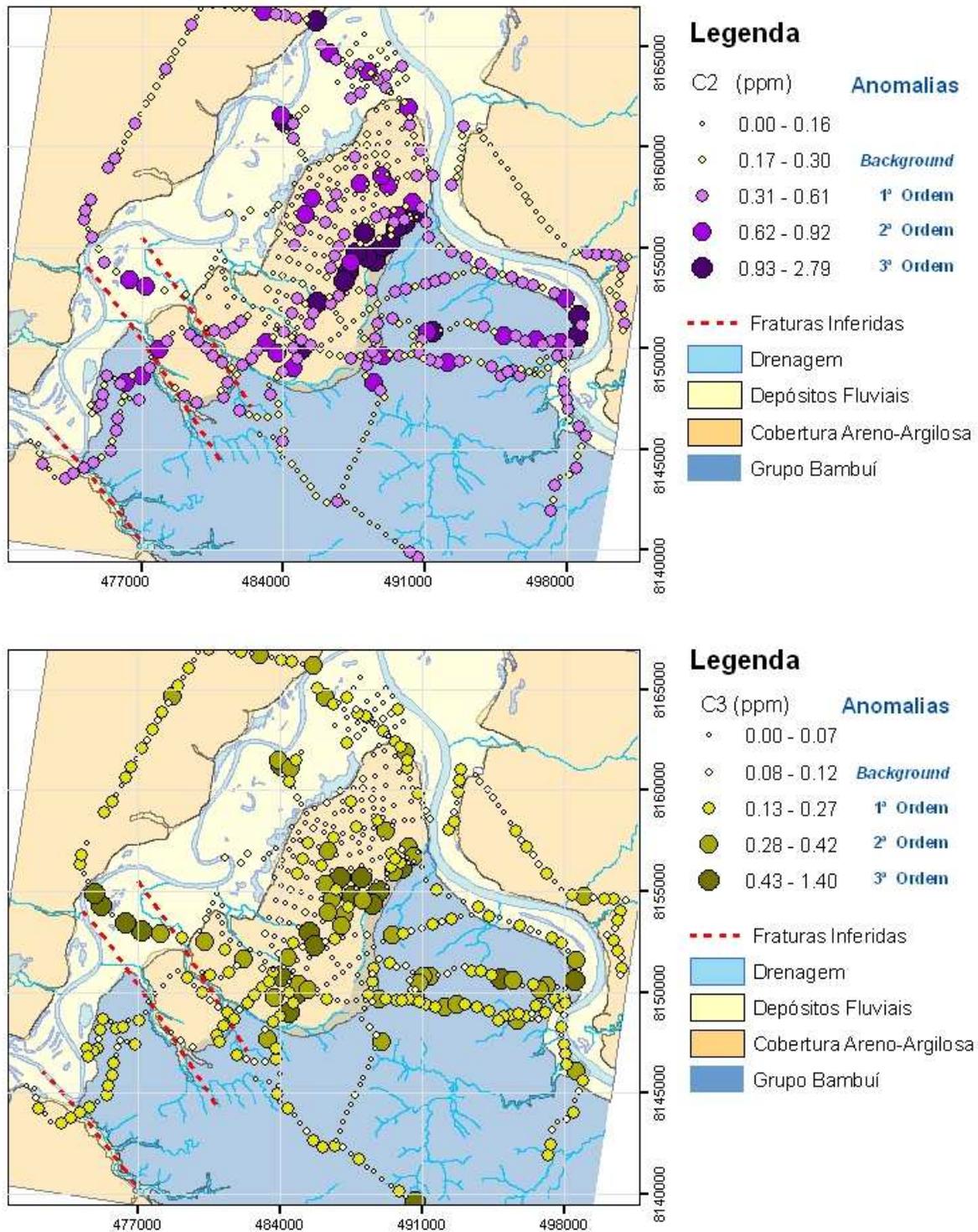


Figura 11. Mapa geoquímico do etano (C2) e butano (C3) sobreposto ao mapa geológico.

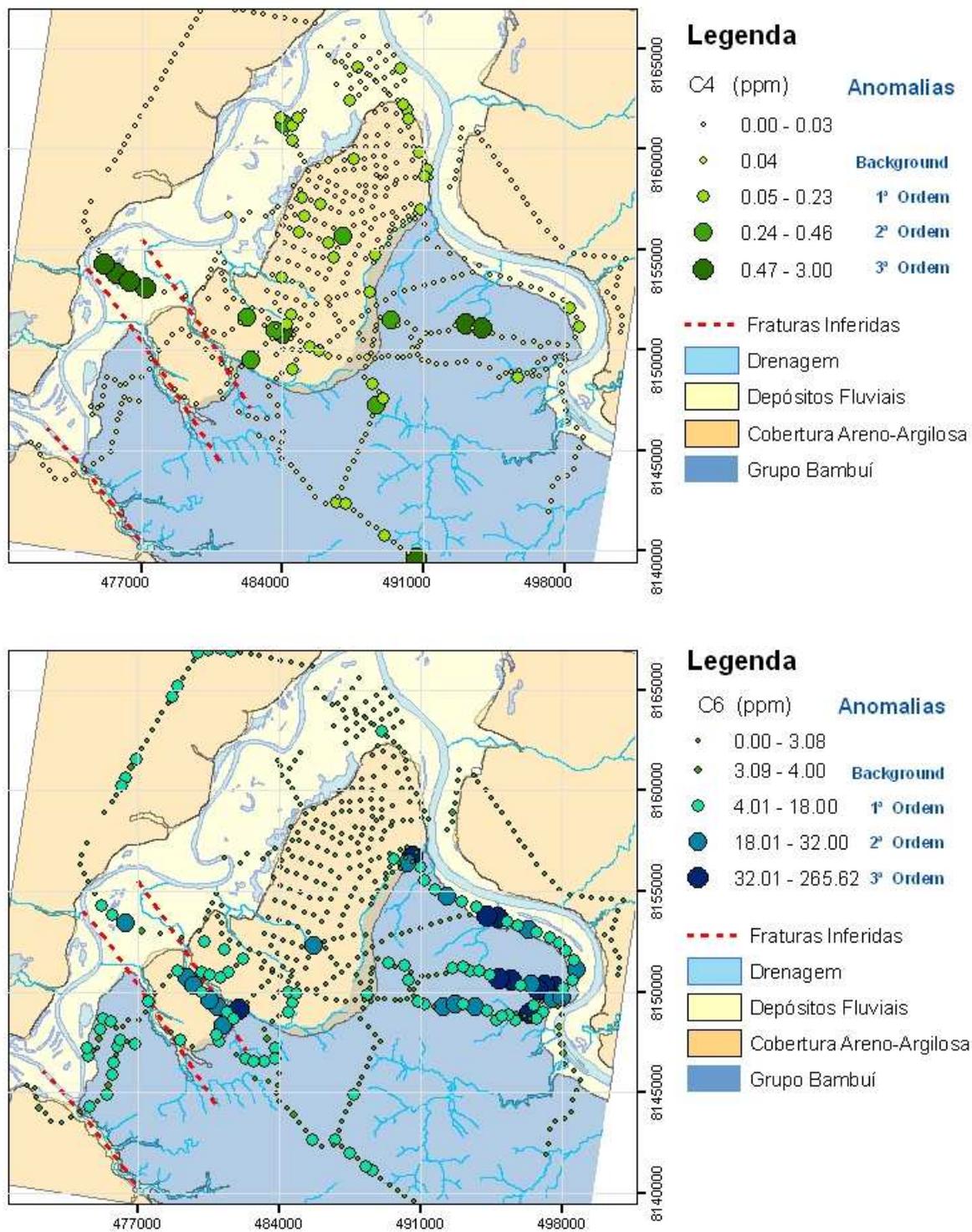


Figura 12. Mapa geoquímico do butano (C4) e hexano (C6) sobreposto ao mapa geológico.

4.0 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O sensor multiespectral ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), a bordo do satélite TERRA, foi lançado em Dezembro de 1999. Este sensor possui três sistemas independentes, os quais coletam dados em 14 bandas espectrais (Figura 13): 3 bandas nas faixas do visível (VIS – visible) ao infravermelho próximo (NIR – near infrared), com resolução espacial de 15m; 6 bandas no infravermelho de ondas curtas (SWIR – shortwave infrared) na resolução de 30m; e 5 bandas na região do infravermelho termal (TIR – thermal infrared), com resolução de 90m (Abrams, 2000).

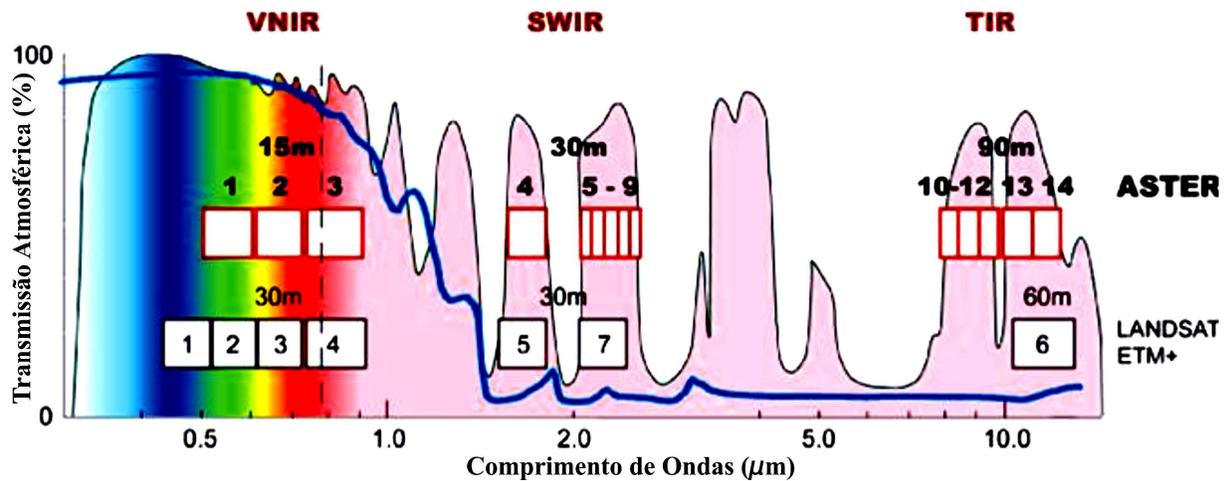


Figura 13. Resolução espectral e espacial dos sensores ASTER e ETM+ (JPL/NASA).

O uso de dados multiespectrais para estudos de alterações no sistema solo-vegetação causadas por microexsudações de hidrocarbonetos foi abordado por diversos autores, entre os quais destacam-se os desenvolvimentos mais recentes de Van der Meer (2002), Noomen et al. (2003), Yang Hong, et al. (2000), Almeida Filho (2001, 2002). Dados multiespectrais obtidos por sensores orbitais como o Landsat TM têm sido bastante utilizados para este fim, porém sua baixa resolução espectral limita a caracterização dos efeitos diretos e indiretos das microexsudações na cobertura. Com advento do sensor ASTER, uma nova janela de oportunidades foi aberta para esse tipo de estudos. Embora dados ASTER venham sendo utilizados para fins multidisciplinares, incluindo mapeamento geológico e exploração mineral, mapeamento de uso e ocupação da terra, monitoramento ambiental, etc (Kruse 2002, Souza Filho et al. 2003, Vicente et al. 2005, Sommer et al. 2005), poucas investigações foram até hoje realizadas para a caracterização espectral de

áreas afetadas por microexsudações baseadas nesses dados (e.g., Lammoglia, 2006), que é o objeto principal desse estudo.

As imagens ASTER utilizadas nessa pesquisa foram obtidas em duas épocas distintas: setembro de 2000 (período seco) e fevereiro de 2001 (período chuvoso). O uso destas duas imagens em períodos diferentes justifica-se pela tentativa de reconhecer possíveis modificações espectrais sazonais na cobertura. Estas imagens foram adquiridas junto à NASA, já convertidas para reflectância (produto ASTER_07 - Abrams & Hook, 2002), segundo a calibração padrão validada pelo ASTER Science Team. As bandas do SWIR, originalmente com 30m de resolução espacial, foram re-amostradas para 15m, permitindo a composição de um arquivo digital único, contendo as 9 bandas do ASTER entre o VNIR e o SWIR.

No processamento desses dados, a principal meta foi a caracterização espectral da vegetação, particularmente a cultura de eucalipto que recobre grande parte da área de estudo, em locais com emanações naturais de gases (hidrocarbonetos), registradas primeiramente no campo por Babinsk & Santos (1987 apud Oliveira 1998) e ratificadas através de dados geoquímicos.

O processamento digital de dados foi executado no ambiente do software ENVI (RSI 2006), obedecendo as seguintes etapas: (i) aplicação do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), visando o realce de áreas com vegetação; (ii) caracterização espectral da vegetação (eucaliptos) em áreas onde anomalias geoquímicas de hidrocarbonetos foram identificadas, em conjunto com pontos conhecidos de ocorrências de exsudações gasosas; (iii) aplicação de duas técnicas de classificação espectral denominadas SAM (Spectral Angle Mapper) e MTMF (Mixture Tuned Matched Filtering), objetivando separar áreas com ocorrências de exsudações de HCs, baseando-se nos seus espectros característicos.

Paralelamente ao estudo da vegetação, buscou-se ainda mapear os principais minerais possivelmente resultantes dos processos de alteração superficial ocasionados pelas microexsudações de HCs (principalmente, caulinita, calcita, minerais portadores do íon ferro ferroso). Para tanto, gerou-se uma máscara a partir do NDVI, separando-se as áreas de solos expostos. Posteriormente, com o uso das técnicas SAM, MTMF e com espectros da biblioteca espectral da USGS re-amostrada para a resolução espectral do sensor ASTER, procurou-se identificar, nos pixels da imagem, minerais eventualmente associados a áreas com concentrações anômalas de HCs na região.

4.1 NDVI (ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DE DIFERENÇA NORMALIZADA)

A vegetação fotossinteticamente ativa (ou sadia) apresenta, entre suas principais características espectrais, uma intensa absorção da radiação em comprimentos de onda do vermelho visível por pigmentos fotossintéticos (clorofila), e intensa reflexão de radiação no infravermelho próximo devido à estrutura foliar (Meneses et al. 2001) (Figura 14). Essa propriedade foi explorada por Rouse et al. (1974) na proposição do NDVI que, desde então, passou a ser amplamente utilizado para determinação de parâmetros como biomassa, vigor, estágio de crescimento, atividade fotossintética, percentagem de cobertura vegetal e outras propriedades biofísicas da vegetação (Meneses, 2001). Este índice tende a realçar as diferenças entre o mínimo de reflexão no vermelho, correspondente ao máximo de absorção por pigmentos das plantas, e o máximo de reflexão no infravermelho próximo, devido à estrutura foliar. Para o cálculo do NDVI ($\lambda_{\text{NIR}} - \lambda_{\text{Vermelho}} / \lambda_{\text{NIR}} + \lambda_{\text{Vermelho}}$) foram utilizadas as bandas 2 ($\lambda_{\text{vermelho}} - 0,66 \mu\text{m}$) e 3 ($\lambda_{\text{NIR}} - 0,81 \mu\text{m}$) do ASTER.

4.2 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO E SOLOS AFETADOS POR MICROEXSUDAÇÕES DE HCS

Hipoteticamente, as principais alterações previstas para a vegetação submetida a algum tipo de estresse são apresentadas na Figura 15. Embora as propriedades espectrais da vegetação na região do visível sejam alteradas, com possibilidade de amarelamento ou avermelhamento da planta (e.g., necroses, cloroses), o estresse também acarreta mudanças profundas das regiões do NIR e SWIR. Na região do SWIR, a reflectância tende a aumentar devido ao desequilíbrio hídrico foliar e, na região do NIR, a reflectância tende a diminuir em função das conseqüentes modificações na estrutura celular da planta e/ou do dossel (Meneses et al. 2001).

Considerando tais propriedades espectrais da vegetação, entre sadia e sob estresse, foram coletados espectros, a partir dos pixels da imagem ASTER (9 bandas VIS-SWIR), dentro e fora das áreas geoquimicamente anômalas sobre a cultura de eucalipto. A Figura 16 ilustra um conjunto de perfis espectrais coletados numa área teste, dentro dessas condições de amostragem.

A análise dos espectros possibilitou a geração de uma biblioteca espectral característica de áreas com vegetação potencialmente afetada e não afetada pelos efeitos indiretos da presença de emissões gasosas. O espectro da vegetação particularmente afetada foi determinado a partir do estudo de espectros extraídos no centro das áreas geoquimicamente anômalas, e escolhido o mais

representativo do estresse na vegetação, com base nas feições de reflectância típicas previstas no modelo da Figura 15. Para vegetação não afetada, foi coletado um conjunto de pixels em locais fora das anomalias e calculada a sua resposta média.

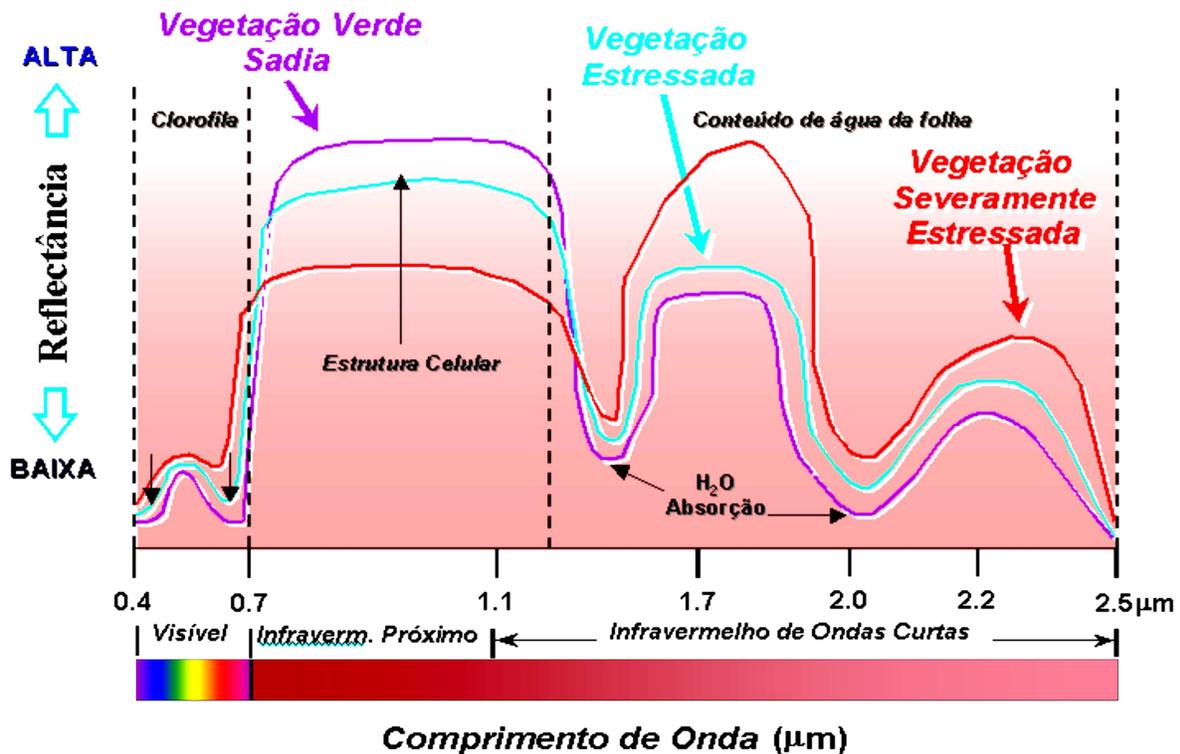


Figura 15. Comparação das curvas espectrais da vegetação sadia e estressada (diagrama esquemático).

4.3 SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)

A técnica SAM (Kruse *et al.* 1993; Boardman & kruse 1994) compreende em uma classificação supervisionada na escala do pixel, calculada com base na similaridade entre o espectro de cada pixel na imagem e os espectros de referência (*endmembers*). Deste modo, os espectros são tratados como vetores no espaço, com dimensionalidade igual ao número de bandas da imagem. O algoritmo determina a similaridade entre dois espectros através do cálculo do ângulo entre os mesmos. Diferentemente de outras técnicas, este método é invisível a mudanças de brilho, uma vez que usa o ângulo entre os vetores e não os seus comprimentos.

A técnica de classificação espectral SAM é uma abordagem inicial no mapeamento de materiais espectralmente predominantes nos pixels, todavia, superfícies naturais dificilmente são compostas por materiais espectralmente uniformes. Como resultado desta classificação são obtidos um mapa de classes e imagens rule, nas quais os pixels mais escuros representam os ângulos de menor valor, ou seja, referem-se aos materiais mais similares aos de referência. Assim, as imagens rule podem ser contra-intuitivas, já que os pixels claros correspondem a ângulos maiores e, portanto, de menor interesse, enquanto ângulos pequenos, associados à maior similaridade entre os pixels de referência e os demais, são representados por pixels escuros. Deste modo, torna-se mais inteligível atribuir aos melhores resultados (ângulos menores) pixels claros e aos resultados de menor interesse (ângulos maiores) pixels escuros, o que pode ser atingido a partir da inversão dos histogramas das imagens rule. No intuito de isolar a informação de maior interesse nessas imagens, seus histogramas devem ser ajustados, de modo a destacar apenas pixels associados a um intervalo pequeno de valores de ângulos (0 a 0,10 radianos, por exemplo). A definição do intervalo pelo especialista deve ser criteriosa, visando realçar os pixels de interesse e evitando a perda de informações importantes.

Neste estudo, os resultados da classificação SAM foram combinados com os resultados do NDVI em um diagrama de dispersão (escatergrama), numa aproximação inédita, objetivando uma melhor avaliação e seleção dos espectros característicos da vegetação estressada.

4.4 MIXTURE TUNED MATCHED FILTERING (MTMF)

A técnica MTMF é uma técnica de classificação espectral na escala do subpixel, ou seja, é um algoritmo que procura nos pixels da imagem as abundâncias dos espectros de referência utilizando-se de uma desmistura parcial através de um filtro (Matched Filtering) de coincidência, maximizando a resposta dos espectros de referência conhecidos (endmembers), ao mesmo tempo em que minimiza a contribuição de um background desconhecido. A reflectância em cada pixel da imagem é assumida como uma combinação linear da reflectância de cada material (ou endmember) presente no pixel; assim os resultados são fortemente dependentes dos endmembers selecionados (Boardman 1995). Os pixels de saída deste processamento apresentam valores entre 0 e 1 (Matched Filter Score), sendo os maiores valores representantes dos pixels mais similares aos materiais de referência. Essa técnica também avalia as improbabilidades (infeasibility), expondo os falsos positivos, pois os alvos mais similares aos endmembers apresentam altos Matched Filter Score e baixos valores de improbabilidades (Boardman et al. 1995).

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do NDVI nos dados ASTER da área de estudo permitiu realçar feições de formato circular com valores baixos de NDVI. Essas feições correspondem aos locais onde a vegetação, particularmente de eucaliptos, é menos abundante ou ausente em meio à plantação mais ampla de eucaliptos (Figuras 16 e 17).

Na imagem o NDVI foi possível ainda definir algumas áreas onde a vegetação apresenta-se genericamente debilitada, caracterizada por valores de NDVI intermediários, onde os eucaliptos estão com menor vigor, indicando possível estresse parcial (contornos em cor azul na Figura 17). Oliveira (1998) sugeriu que estas feições circulares estão associadas diretamente à presença de emanções de HC gasosos. A existência destas feições foi confirmada em trabalhos de campo e são de fácil reconhecimento pelo desenvolvimento incipiente ou nulo de eucaliptos e pelas dimensões das áreas afetadas, que podem variar de 20 a 150 m em diâmetro (Figura 17).

A partir da caracterização espectral foi possível distinguir algumas feições que permitiram uma boa diferenciação da vegetação nas áreas geoquimicamente anômalas. A principal foi a mudança de comportamento da reflectância nas bandas 2, 3, 4 e 6 (Figuras 16 e 18). A comparação da vegetação sadia (VS) (fora da anomalia) com a vegetação estressada (VE) (dentro da anomalia) (Figuras 16 e 18), mostrou uma inversão da reflectância nas bandas 3 e 4, com um aumento da reflectância na banda 4 para VE e banda 3 para VS, enquanto para a banda 4 na VS e banda 3 na VE houve um decréscimo da reflectância.

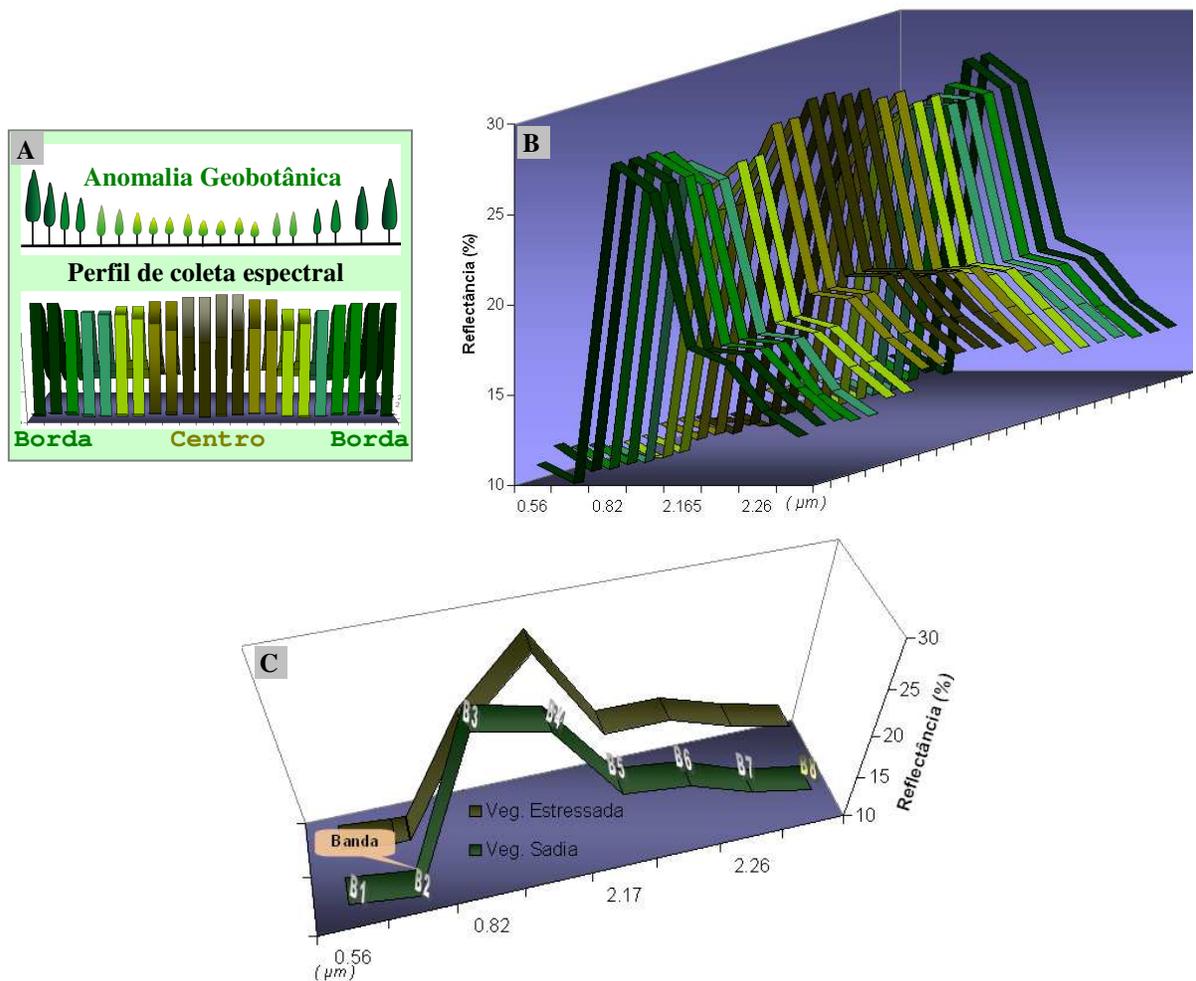


Figura 16. Perfis espectrais extraídos da imagem ASTER (período seco: 05/09/2000), entre a borda e o centro de uma das anomalias geoquímicas de HCs investigadas na área de estudo. . Em (A) e (B) esses perfis são apresentados, respectivamente, sem seção longitudinal e em perspectiva. Espectros verdes representam a vegetação sadia (VS), fora da anomalia geoquímica, e espectros marrons representam a vegetação estressada (VE) no centro da anomalia; outras cores representam espectros extraídos em posições intermediárias a esses dois externos. Com base nessas figuras é possível notar uma evidente e consistente variação espectral entre as zonas de borda e centro da anomalia, que é acompanhada, conforme verificado no campo, por uma variação da cobertura vegetal (A), constituindo, portanto numa anomalia geobotânica bem definida. Em (C), destaca-se dois espectros extraídos no centro e na borda da anomalia geoquímica/geobotânica. Note que entre a região do NIR e SWIR (bandas B3 e B4), há uma distinta inversão espectral entre o comportamento da vegetação não afetada ou menos afetada pelas microexsudações (VS, com alta reflectância na banda B3 e baixa reflectância relativa na B4) e a vegetação muito afetada pelos HCs (VE, com alta reflectância na banda B4 e baixa reflectância relativa na B3). Esses comportamentos condizem com aqueles previstos para vegetações saudias e sob estresse.



Figura 17. Imagem NDVI, derivada dos dados ASTER adquiridos no período seco (05/09/2000), apresentada em pseudocor, com matiz verde. Esse produto foi preparado de forma que as matizes de verde mais claro e mais escuro, representam, respectivamente, menor e maior quantidade de biomassa. Nas duas áreas sob foco, o contorno azul marca uma ampla região onde o NDVI é mais baixo. Em maior detalhe, nota-se que nesses setores ou próximos aos mesmos, há realce de áreas aproximadamente circulares (setas vermelhas) onde os eucaliptos são pouco desenvolvidos ou ausentes. Na parte inferior da figura, são apresentadas fotos dos locais verificados no campo que validam as observações feitas a partir desse produto ASTER.

Esta diminuição de reflectância na banda 3 (NIR) indica modificações significativas no dossel e, possivelmente, ao nível de estrutura celular das plantas, pois, nesta região do espectro, ocorre considerável espalhamento da radiação na estrutura interna nas folhas e alta reflectância. Nas bandas 4, 5 e 6 e, em geral, em todo o intervalo do SWIR, ocorreu um aumento da reflectância para VE (Figura 18). Acredita-se que este comportamento no SWIR pode ser resultado de dois fatores: (i) da perda de água foliar somada a conseqüente modificação na estrutura celular da vegetação, devido o estresse, resultantes da baixa fertilidade do solo; (ii) da soma das respostas espectrais da vegetação mais solos e folhas mortas, pois estas áreas anômalas têm baixa densidade de biomassa, o que favorece a exposição dos solos, que por sua vez, são geralmente recobertos parcialmente por folhas secas do próprio eucalipto.

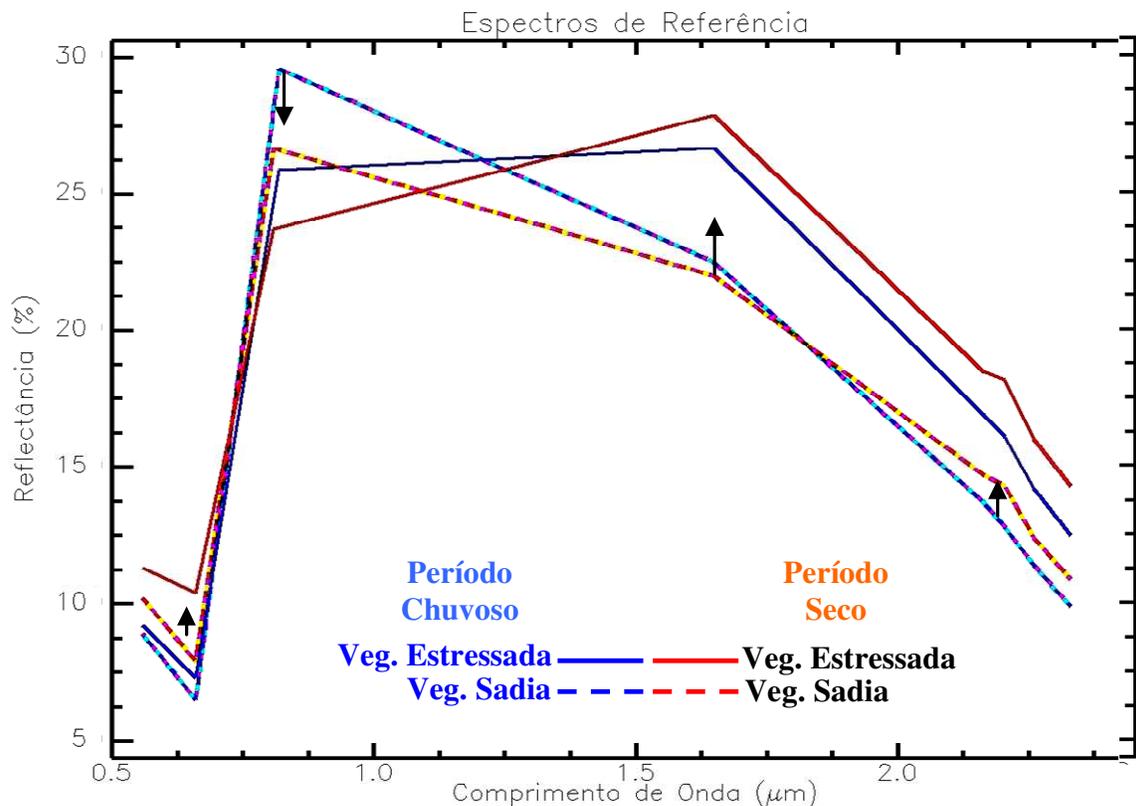


Figura 18. Espectros de referência para áreas dentro da anomalia (vegetação estressada) e fora da anomalia de HCs (vegetação sadia), no período chuvoso (02-2001) e seco (09-2000), considerando o intervalo do espectro coberto pelas bandas VIS-SWIR (bandas 1-9) do ASTER..

Nas bandas 1 e 2, onde as feições espectrais da vegetação são controladas por pigmentos foliares, a vegetação sob estresse também mostrou importantes modificações na sua reflectância.

A VE exibiu um significativo aumento da reflectância em relação à VS, confirmando a perda de pigmentos (clorofila) devido o estresse resultante das deficiências nutricionais causado indiretamente pela presença de HCs.

A comparação das respostas espectrais da vegetação em imagens adquiridas no período chuvoso (02/2001) e no período seco (07/2000), em pontos redundantes nas imagens, mostrou que os espectros da VS e VE (Figura 18) analisados tiveram o mesmo comportamento nos dois períodos, porém com intensidades de reflectância diferentes.

Para faixa do visível, as diferenças de reflectância entre VE e VS foram maiores no período seco, indicando que o estresse hídrico, causado indiretamente pela presença de HCs, no período de estiagem (setembro), agrava ainda mais a perda de clorofila e a queda das folhas. Ainda no visível, comparando-se a VE nos dois períodos, percebe-se que a perda de clorofila no período chuvoso é menor. Isso implica que em períodos mais úmidos, os efeitos do estresse na reflectância do visível é mascarado em função da manutenção ou aumento da área foliar (dossel). No NIR, as diferenças das reflectâncias entre VE e VS foram expressivas (4%). Considerando-se os dois períodos analisados, tais diferenças de reflectância também foram importantes. Este comportamento da reflectância no NIR mostra que a vegetação de eucalipto sofreu mudanças na sua estrutura celular e, em parte, no conteúdo de água foliar, mesmo no período chuvoso. Outro fato interessante é que, apesar da reflectância na vegetação ter apresentado um aumento na banda 3, entre o período chuvoso e período seco (implicando num ganho em estrutura, dossel), a diferença de reflectância entre VS e VE ainda foi mantida, independente da maior disponibilidade de água no ambiente.

Na região do SWIR a vegetação tem resposta muito similar com o NIR, mostrando um forte aumento da reflectância da VE em relação à VS em toda faixa, para ambos os períodos. As diferenças entre as reflectâncias da VE e VS são também significativas (5%) e preservadas nas duas épocas. Isso mostra que a correlação entre aumento da reflectância e o estresse na vegetação se preserva, apesar do acréscimo hídrico (fato que normalmente gera forte diminuição da reflectância nesta faixa do espectro). Ainda no SWIR, na banda 4, a diferença da reflectância entre VE e VS no período seco é da ordem de 6% (maior diferença ao longo do espectro) e no período chuvoso aproximadamente 4%, mostrando que essa é a característica mais marcante da VE em relação a VS nos dois períodos.

Estes resultados indicam que na região do NIR e SWIR a VE apresenta um forte aumento da refletância em relação à VS, independente das condições ambientais, ou seja, no dois períodos analisados (seco e chuvoso). Na faixa do visível, a refletância da VE tende a sofrer uma maior influência no período seco. Contudo, os espectros mais representativos da vegetação estressada foram identificados na imagem do período seco, onde toda faixa do espectro refletido teve importantes alterações, indicando ser esse o período mais apropriado para o mapeamento de feições espectrais na vegetação de eucaliptos sob estresses induzidos por HCs.

5.1 MAPEAMENTO ESPECTRAL

O mapeamento espectral da VE a partir da técnica SAM foi aplicado em toda área de eucalipto. Porém, a classificação obtida para vegetação não teve uma boa resposta para toda área, mostrando áreas de VE além dos limites das anomalias geoquímicas. Contudo, percebeu-se que, apesar dos espectros de referencia em todas as áreas anômalas (HC) dentro da cultura apresentarem as mesmas características de refletância, suas intensidades são diferentes para pontos anômalos distintos. Isso impossibilitou a geração de um espectro característico para toda área. Esta diferenciação espectral dos alvos pode estar relacionada a particularidades como, tipo de solo, quantidades e frequência de exsudações e resposta diferenciada do estresse na vegetação em cada ponto anômalo. Outro fator importante é que, conforme verificado em entrevistas com fazendeiros da região, várias áreas onde os eucaliptos não se desenvolveram devidamente, foram mais intensamente adubadas, na tentativa de recuperá-las. Essa ação logrou êxitos em alguns setores, entretanto noutros, mesmo com adubação adicional, a cultura de eucalipto não se desenvolveu.

Com base na observação acima, foi aplicada a técnica SAM de forma localizada, objetivando mapear anomalias específicas em locais diferentes em toda área da cultura. O mapeamento a partir da técnica MTMF também foi aplicado localmente, mas gerou resultados diferentes da técnica SAM em ambas as imagens, mostrando pontos mais disseminados. Porém, de forma genérica, as áreas de ocorrência de VE mapeada pelo MTMF são semelhantes àsquelas mapeadas pelo SAM, e ambas são coincidentes ou próximas das anomalias de HCs (Figuras 19 e 20). A maior diferença no mapeamento compreende a quantidade de pontos mapeados, mais restritos no caso do resultado obtido pelo MTMF. Isso reflete uma ‘aparente’ maior precisão deste método no mapeamento, função da possibilidade de descarte de falsos-positivos.

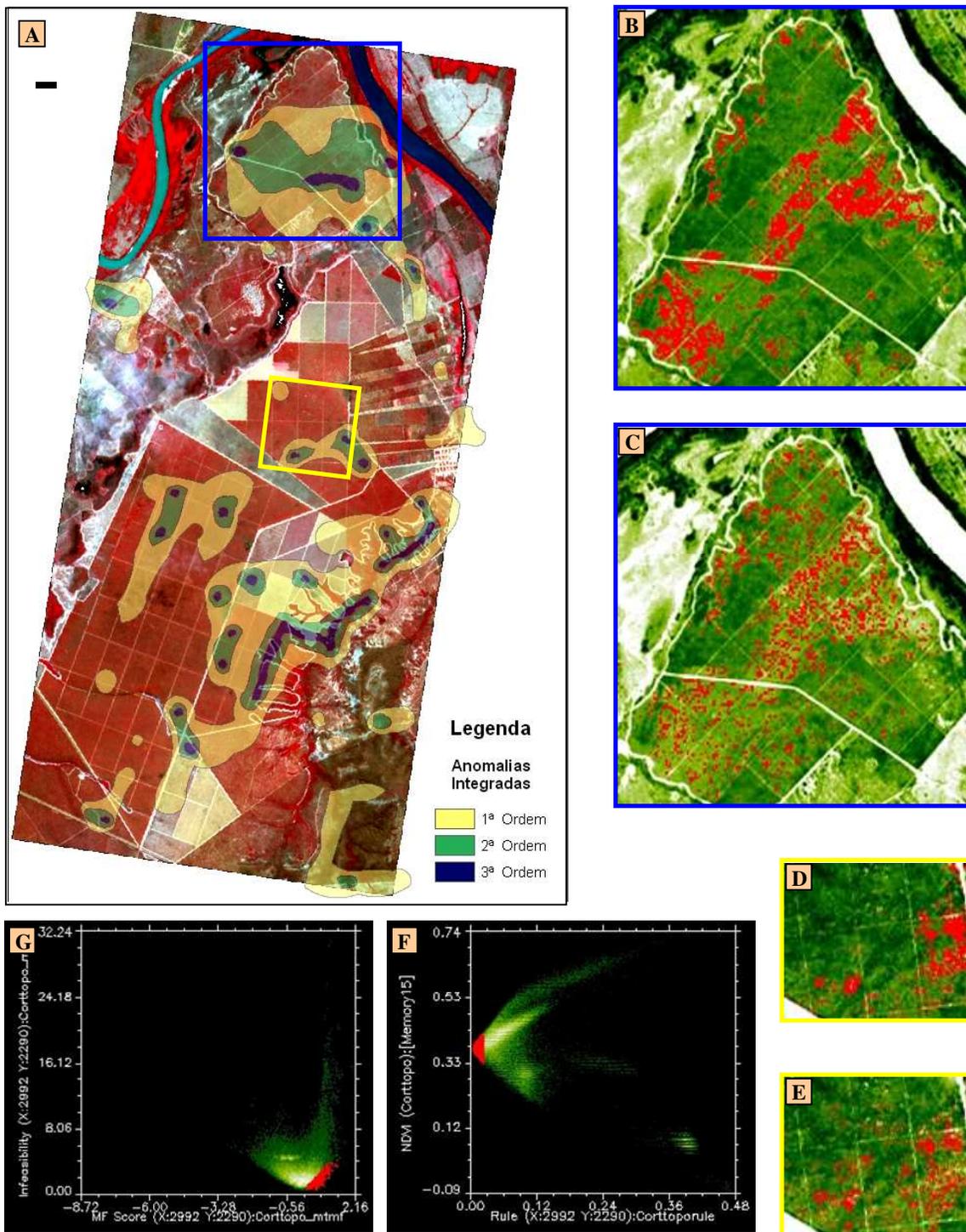


Figura 19. (A): Imagem ASTER R3G2B1 (09/2000) sobreposta às anomalias geoquímicas de todos HCs integrados. (B) e (D): Resultado da classificação SAM para vegetação estressada (VE) (em vermelho) sobreposta à imagem NDVI (fundo, em matiz verde). Os pixels ‘anômalos’, nesse caso, foram selecionados com base no escartergrama da Figura (F), considerando-se não somente os menores ângulos da imagem *rule* do SAM (eixo X), mas também e simultaneamente, os menores valores de NDVI (eixo Y). (C) e (E): Resultado da classificação MTMF para VE (vermelho). Em (G): escartergrama com os valores de MF Score vs improbabilidade usado na classificação MTMF.

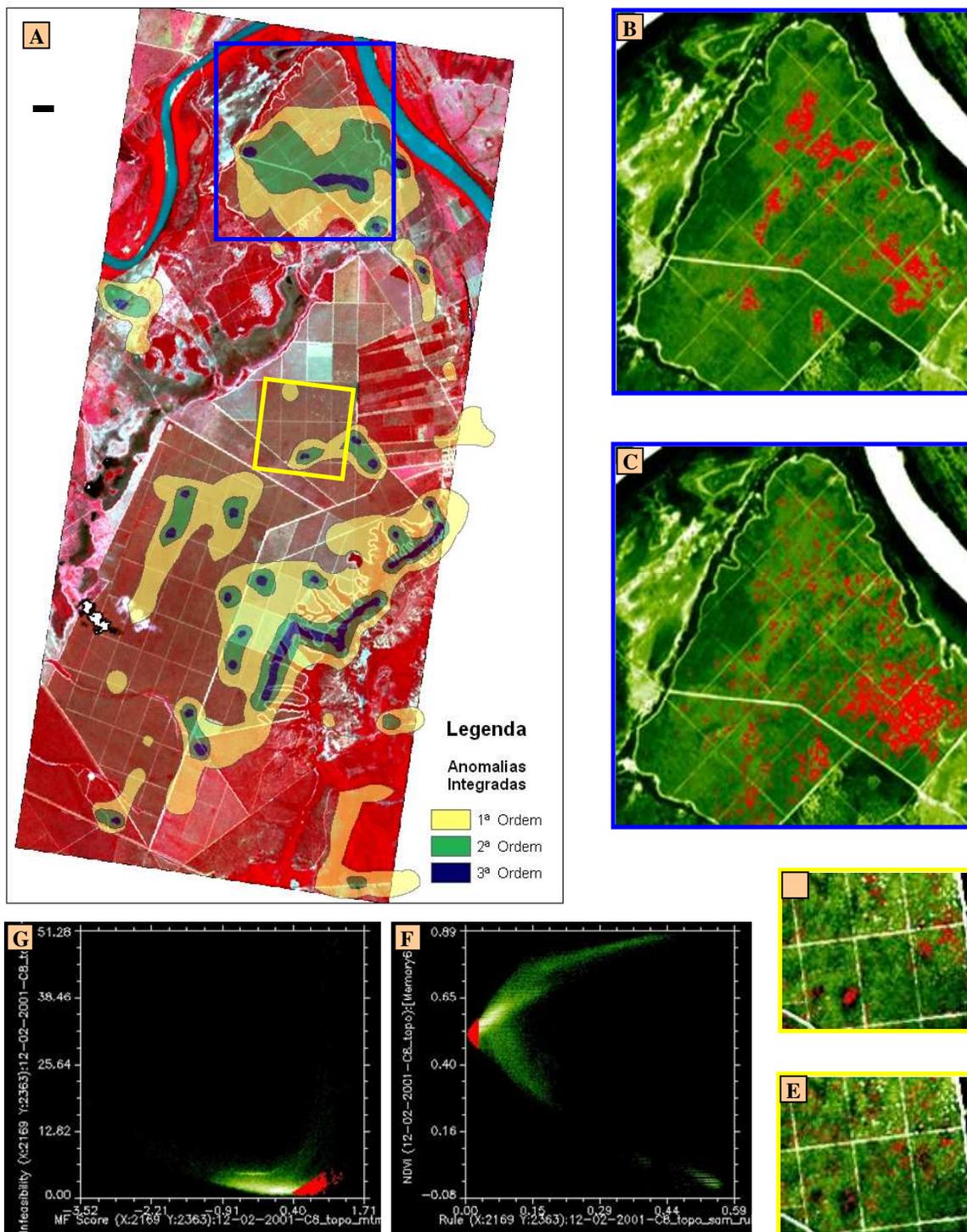


Figura 20. (A): Imagem ASTER R3G2B1 (02/2001) sobreposta às anomalias geoquímicas de todos HCs integrados. (B) e (D): Resultado da classificação SAM para vegetação estressada (VE) (em vermelho) sobreposta à imagem do NDVI (fundo, matiz verde). Os pixels ‘anômalos’, nesse caso, foram selecionados com base no escartergrama da figura (F), considerando não somente os menores ângulos da imagem *rule* do SAM (eixo X), mas também e simultaneamente, os menores valores de NDVI (eixo Y). (C) e (E): Resultado da classificação MTFM para VE (vermelho). Em (G) escartergrama com os valores de MF Score vs improbabilidade usados na classificação MTFM.

Particularmente para o mapeamento de vegetação estressada, o resultado da técnica SAM teve a melhor resposta, considerando-se a posição geográfica das anomalias geoquímicas, áreas conhecidas de microexsudações e pixels mapeados. Este fato se justifica justamente devido às características do estresse na vegetação. A vegetação não responde de forma única ao estresse - em cada ponto, planta, tipo de solo e período (chuvoso, seco), a resposta da VE é diferenciada. Isso implica numa resposta espectral também distinta, o que gera, na realidade, uma gama de espectros característicos muito parecidos entre si, mas não um único espectro.

O fato da resposta da vegetação submetida ao estresse ser variada, talvez explique o motivo dos resultados obtidos pelo método SAM serem superiores, visto que essa técnica gera uma imagem com resultados angulares entre o espectro de referência e o da imagem, permitindo separar os espectros mais parecidos com o espectro de interesse. Isso propicia mapear o espectro de referência e também toda a gama de espectros similares, ou seja, áreas mais e menos estressadas.

Os resultados entre o mapeamento da VE nas imagens obtidas nos dois períodos analisados foram diferentes para o SAM e MTMF, apontando áreas distintas e de menor dimensão. Esse efeito pode ser resultado do aumento do dossel em alguns locais, onde a vegetação reagiu, com crescimento de novas folhas, na presença de chuvas, mascarando, assim, os efeitos do estresse advindo da deficiência nutricional. Com isso, áreas mapeadas como estressadas no período seco, foram mapeadas como não estressadas no período chuvoso. Isso foi possível devido à recuperação diferenciada da vegetação. A vegetação estressada mapeada na imagem de setembro se recuperou rápido com as chuvas, enquanto a vegetação mapeada na imagem de fevereiro como estressada, não teve a mesma reação, continuou estressada, dando a idéia de que a VE variou em posição geográfica.

A vegetação natural (tipo cerrado) fora da cultura de eucaliptos também foi mapeada, por ambas as técnicas, no período seco, como VE em pontos próximos as anomalias. Isto possivelmente ocorreu pois os espectros do cerrado, em alguns locais, muito se assemelham aos dos eucaliptos estressados neste período. A análise espectral de pontos no cerrado, dentro e fora das anomalias, entretanto, não forneceu informações significativas que pudessem indicar uma concreta influência dos HCs. As mudanças espectrais observadas devem-se, provavelmente, a variações devido à presença de cerrado nativo e alterado, vegetação rasteira, mudança de solo, condições edáficas, etc. O cerrado é uma vegetação muito diversificada, complexa, de fácil

adaptação e capaz de tolerar situações extremas de clima, tipos de solos e etc. Ressalta-se ainda que algumas espécies de plantas que compõe o cerrado, no período de estiagem, ressecam e tornam-se fotosinteticamente inativas (devido ao estresse hídrico), gerando respostas espectrais muito semelhantes ao estresse oriundo indiretamente da presença de HCs.

Uma ressalva importante refere-se a data de obtenção das imagens (2000 e 2001) e a data de aquisição dos dados de referência para as anomalias de HCs (dados geoquímicos, 1987). Estes fenômenos de exsudações são muito variáveis ao longo do tempo, o que pode ocasionar extinção e/ou diminuição da intensidade dos escapes de gases em superfície, somados a possíveis migrações diferenciais da posição geográfica dos mesmos. No período de cerca de 15 anos (intervalo entre a obtenção dos dados geoquímicos e as imagens ASTER), esses fenômenos podem ter ocorrido na região, o que pode explicar o fato de que alguns locais mapeados como anômalos nas imagens não têm uma contrapartida em relação aos pontos anômalos nos dados geoquímicos, e vice-versa.

Outro processo que pode influenciar na posição geográfica das ocorrências de exsudações de HCs são as variações do nível freático. Partindo da idéia que os escapes estão sendo controlados por faturamento em profundidade por toda região, os HCs, quando próximos à superfície, podem sofrer influências na direção e sentido do transporte, principalmente pelas águas subterrâneas rasas (zona saturada). Essa zona sofre significativa mudança sazonal em função da recarga do aquífero oriunda de chuvas, principalmente na profundidade do nível freático.

O mapeamento de minerais como caulinita, calcita e compostos com íon ferro ferroso, relacionados à presença de emanções de HC, foi dificultada em função da escassez de áreas sem cobertura vegetal, as quais são muito restritas no local de pesquisa. Nas áreas onde foi possível realizar-se algum tipo de avaliação, a presença de caulinita foi detectada (Figura 21), porém, sem relação geográfica direta com as anomalias de HCs. A caulinita foi identificada com base nas imagens ASTER basicamente em dois locais: (i) sobre depósitos aluvionares nas áreas de inundação do rio Paracatu (Figura 21b) e na lateral de um vale sobre as formações do Grupo Bambuí (Figura 21c). A presença deste mineral é naturalmente comum nestes tipos de depósitos aluvionares, principalmente considerando-se a composição das rochas do Grupo Bambuí existentes na região, incluindo argilitos e siltitos, que são abundantes nesse mineral.



Figura 21. (A): Imagem ASTER R3G2B1 (09/2000) sobreposta às anomalias geoquímicas de todos os HCs integrados. (B) e (C): Resultado da classificação SAM para caulinita (em vermelho) sobreposta à imagem do NDVI (fundo, em matiz verde).

5.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Grande parte das anomalias geoquímicas e VE mapeadas via imagens foram visitadas no campo, quando procurou-se constatar-se áreas anômalas apontadas pela geoquímica e possíveis alterações na vegetação *in situ*.

A principal característica observada em campo nas áreas anômalas foi a deficiência da vegetação na forma de feições circulares na cultura de eucaliptos, como detectada através do NDVI. Isso, provavelmente, está relacionado ao estresse advindo de deficiências nutricionais, o que implicou na diminuição da densidade da vegetação em torno de locais onde as exsudações são mais ativas (Figura 17). Além disso, os eucaliptos nestes pontos apresentaram folhas de coloração e forma diferenciadas (amareladas e atrofiadas) (Figuras 22e), comprovando a mudança na presença de clorofila e na estrutura celular das folhas.

Em alguns pontos, foram também identificadas outras espécies de plantas com problemas aparentes, além do eucalipto. Uma planta rasteira e espinhosa, popularmente denominada de “Juá”, apresentou frutos e folhas subdesenvolvidas (Figura 22f) em áreas anômalas de HCs, em contraste com outras áreas.

Nas áreas anômalas em HCs compreendidas no cerrado, embora não tenha sido possível uma correlação não ambígua das feições espectrais derivadas dos dados ASTER, que mostraram-se comuns às variações desse bioma, verificou-se, entretanto, uma menor densidade da vegetação sobre essas anomalias (Figura 22a).

No campo foi possível ainda localizar, ao longo de drenagens, escapes contínuos de gases de HCs (Figuras 22. b,c e d), destacados na forma de borbulhamentos na superfície da água. Esse fenômeno corrobora o controle destes escapes por estruturas (fraturas), visto que boa parte dos cursos d’água na região são encaixados em estruturas rúpteis (Oliveira 1998).



Figura 22. A. Área de cerrado em ponto com anomalias geoquímicas de HC, onde a vegetação é pouco desenvolvida a menos densa. B, C e D. Pontos em riachos distintos da região com presença de escapes de gases na forma de borbulhamentos na lamina d'água. E. Folhas de eucaliptos dentro e fora das anomalias - Folha sadia (1), folhas possivelmente com deficiência em cálcio e nitrogênio (2) e (3), potássio (4), e em fósforo (5), (cf. descrição baseada em análises de Oliveira 1998). F. Juá, desenvolvido sobre anomalia de HC, com nanismo e exibindo fruto com sinais de deficiência nutricional e/ou hídrica.

6.0 CONCLUSÕES

A análise do comportamento da vegetação com base em imagens ASTER convertidas para reflectância, particularmente em um ampla plantação de eucaliptos na região de Buritizeiros (MG), afetada por microexsudações de HCs, permitiu a caracterização de setores contendo vegetação estressada, cuja resposta espectral indicou diferentes intensidades de estresse, assim como variações temporais/sazonais, entre períodos secos e úmidos. Dessa análise, ficou evidente que o período mais adequado para caracterização deste tipo de alteração em vegetação de eucalipto é a época de estiagem, pois neste período o estresse é intensificado devido, principalmente, ao déficit hídrico.

A aplicação do NDVI possibilitou a localização de anomalias espectrais circulares, onde a vegetação é menos densa ou ausente, circunscritas a plantação de eucalipto – ou seja, tratam-se de anomalias geobotânicas. Essas anomalias espectrais e geobotânicas são coincidentes com áreas mapeadas como geoquimicamente anômalas, com base em dados de gasometria, indicando sua relação com possíveis deficiências nutricionais e hídricas na vegetação, causadas pela presença de HCs durante seu desenvolvimento. O NDVI também permitiu a definição de áreas mais amplas onde a vegetação encontra-se aparentemente submetida a estresses intermediários.

Os resultados do mapeamento espectral utilizando-se as técnicas de classificação hiperespectral SAM e MTMF, adaptadas aos dados do sensor ASTER, também foram positivos quando aplicados nesse estudo de caso, apesar da dificuldade na aplicação do mapeamento ao nível regional, o qual mostrou-se mais adequado quando aplicado localmente e englobando áreas menores. Os resultados obtidos com o método SAM combinado ao NDVI proporcionou uma melhor definição de áreas com vegetação estressada, quando comparados aos resultados derivados pelo método MTMF. A melhor performance obtida através do método SAM, da forma como aqui aplicado, possivelmente tem relação com o comportamento espectral verificado na vegetação estressada, que apresentou uma gama de espectros característicos muito parecidos entre si, mas não um espectro único e bem definido.

A floresta de eucalipto, por se tratar de uma monocultura introduzida e controlada pelos fazendeiros na região, de certa forma facilitou a identificação das alterações impostas indiretamente pela presença de HCs. Em áreas com cerrado nativo, onde existe um número muito maior de espécies, muitas das quais adaptadas às condições extremas de estresse hídrico, a

identificação de alterações advinda das influências de HCs mostrou-se bem mais complexa, o que requer estudos mais específicos e de detalhe.

Ressalta-se que alguns cuidados devem ser tomados neste tipo de estudos com vegetação, pois alterações visíveis e espectrais, similares àquelas aqui descritas, podem ser causadas por outros processos (e.g., tipos de rochas, tipos de solos, clima, misturas de solos), sem nenhuma relação com microexsudações de HCs.

A possível relação mineralógica de caolinita e outros minerais-chave com a presença de HCs, comum em varias partes do mundo, não foi constatada na região de estudo, devido a restrita exposição de áreas sem cobertura vegetal. Nesse trabalho, a caolinita foi mapeada majoritariamente em áreas não anômalas em HCs, sendo sua presença função de condições geológicas e ambientais locais.

Esse estudo apontou a associação espacial entre anomalias geoquímicas e geobotânicas na região de Buritizeiros, com base numa aplicação de sucesso de dados ASTER, espectros modelados e técnicas de classificação hiperespectral, somadas a técnicas tradicionais complementares. Este estudo de caso revela um potencial favorável desse ferramental para a detecção e caracterização de microexsudações, as quais constituem importantes indícios para ocorrência de recursos de óleo e gás.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams M. 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER); Data products for the high spatial resolution imager on NASA's EOS-AMI platform. *International Journal of Remote sensing*, **21** (5); 847-861.
- Abrams, M., Hook, S. 2002. Aster User Handbook: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, V2, 135p.
- Alkmim F.F., Chemale Jr F., Endo, I. 1996. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e seu significado tectônico. *Revista da Escola de Minas* 49(1): 22-38.
- Alkmim, F.F., Brito Neves, B.B., Castro Alves, A.J. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton São Francisco In: Domingues, J.M.L.; Misi, A. (ed.) O Cráton São Francisco. Salvador, SBG/Núcleo BA/SE., 45-62.
- Alkmim, F.F., Martins Neto, M.A. 2001. A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos. In: C.P. Pinto, M.A. Martins Neto (eds). Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. SBG MG, Belo Horizonte, p. 9-30.
- Almeida-Filho, R. 2001. Processamento digital de imagens Landsat-TM na detecção de áreas de microexsudação de hidrocarbonetos, região da Serra de Tonã, Bahia. In: SBSR, *Workshops*, Fox do Iguaçú, X, INPE, P. 235-242.
- Almeida-Filho, R., Miranda, F.P., Yamakawa, T., Bueno, G.V., Moreira, F.R., Camargo, E.G. and Bentz, C.M. 2002. Data integration for a geologic model of hydrocarbon microseepage areas in the Tonã Plateau region, North Tucano basin, Brazil. *Canada Journal of Remote Sensing*, 20: 2683-2688.
- Almeida-Filho R., Miranda F.P., Yamakawa T. 1999. Remote detection of a tonal anomaly in an area of hydrocarbon microseepage, Tucano basin, north-eastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 2683-2688.
- ANP (Agencia Nacional do Petróleo). Acessado em: http://www.bdep.gov.br/webmaps_download.html. Disponível em setembro de 2005.

-
- Augusto, V. A., Souza Filho, C. R., Almeida Filho, R. 2003. Caracterização de Exsudações de Hidrocarbonetos na Bacia do São Francisco-MG Por Meio de Imagens ASTER. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR Goiânia - GO, 16-21 de abril de 2005.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., Green, R. O, 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. *In Summaries*, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop. JPL Publication 95-1, v. 1, pp. 23-26.
- Boardman, J.W. & Kruse, F. A. 1994. Automated analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: *In*; Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Proceedings, MI, I-407-I-418.
- Hunt, J.H., 1981, Surface geochemical prospecting pro or con. Invited Paper at: the AAPG Annual Convention, San Francisco, May.
- Jones, V. T., and R. J. Drozd, 1983, Predictions of oil or gas potential by near-surface geochemistry: AAPG Bull., v. 67, p. 932-952.
- JPL/NASA, Mike Abrams. Apresentação em Formato PPT. Disponível em: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/bibliography.asp>. Acessado em: 20 de agosto de 2005.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T. Barloon, P. J., Goetz, A. F. H., 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, v. 44, p. 145–163,
- Kruse, F.A., 2002. Combined SWIR and LWIR Mineral Mapping Using MASTER/ASTER. *In: Proceedings*, IGARSS 2002, Toronto, Canada, Also in Hardcopy, IEEE Operations Center, Piscataway, NJ. IV: 2267-2269 (CD-ROM).
- Link, W.K., 1952. Significance of Oil and Gas Seeps in World Oil Exploration. *Amer. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, V. 36, p. 1505-1540.
- Meneses, P. R., Madeira Neto, J. S. 2001. Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais - Brasília, DF: UNB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 262p.
- Noomen, M.F., Skidmore, A.K., van der Meer, F.D., 2003. Detecting the Influence of Gas Seepage on Vegetation, using Hyperspectral Remote Sensing. ITC, Hengelosestraat 99, Enschede, The Netherlands.

-
- Oliveira, W. J. Caracterização das Emanações gasosas de hidrocarbonetos na região do Remanso do Fogo (MG) através do uso integrado de sensoriamento remoto, geoquímica, geofísica, geologia estrutural e espectrometria de reflectância. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. 1998.
- Pinto, C.P., Martins – Neto, M.A. (Org.) 2001. Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG - MG, v. Único, p. 245.
- Ripple, W. J. (1986). Relationships of spectral reflectance to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.52, n.10, p.1669-1675.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C. 1994. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. 1ed. Pasadena: JPL Publication (NASA/GSFC), 151 pp.
- Saunders, D.F., Burson, K.R. and Thompson, C.K., 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 83, 170–185.
- Schumacher, D. 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, hydrocarbon migration and its near-surface expression. In: *Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression* (D. Schumacher and M.A. Abrams, eds). *Mem. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 66, 71±89.
- Sommer, J.A.P., Saldanha, D.L., Lima, E.F., Sommer, C.A., Alvarenga, R.S., 2005. Contribuição de imagens ASTER no mapeamento de litotipos do Platô da Ramada-RS. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII Anais, INPE. Goiânia*, p. 1911-1913.
- Souza Filho C.R., Tapia Calle C.H., Crosta A.P., Xavier R.P. 2003. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. In: *Proceedings of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003 Annual Conference*, 1-12 (CD-ROM).
- Thompson, C.K., Saunders, D.F. and Burson, K.R., 1994. Model advanced for hydrocarbon microseepage, related alterations. *Oil Gas J.*, 14, 95–99.
- Toledo, M.A.S., Zalán, P.V. 1998. Reservoir Facies in the Proterozoic São Francisco Basin – Mid-Continent of Brazil. In: *AAPG, Int. Conference & exhibition, Rio de Janeiro, Extended Abstracts*: 220-221.
- Trasher, J., Fleet, A.J., Hay, S.J., Hovland, M., and Düppenbecker, S., 1996. Understanding geology as the key to using seepage in exploration: spectrum of seepage styles, in

-
- Schumacher, D. and Abrams, M.A. (eds.), Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66, p. 223-241.
- Van der Meer, F., Van Dijk, P., Van der Werf, H., Yang, H., 2002. Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. *Terra Nova.*, 14 (1), 1-17.
- Van der Werff, H. & Lucier, A. 2003. A contextual algorithm for detection of mineral alteration halos with hyperspectral remote sensing. In: De Jong, S. & Van der Meer, F.(Eds.), Remote sensing image analysis: including the spatial domain. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, p. 201-210.
- Vicente, L. E., Souza Filho, C. R., Perez Filho, A., 2005. Mapeamento de formações arenosas em fragmentos de Cerrado utilizando dados e produtos do sensor ASTER. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII Anais, INPE. Goiânia, p. 3419-3426.
- Yang Hong, Zhang, J., van der Meer, F.D. and Kroonenberg, S.B., 2000. Imaging spectrometry data correlated to hydrocarbon microseepage. In: International journal of remote sensing, 21, pp. 197-202.
- Segel, D.B. and Merin, I.S., 1989. Successful use of Landsat Thematic Mapper data for mapping hydrocarbon microseepage-induced mineralogic alteration, Lisbon Valley, Utah. *Photogramm. Engng Remote Sens.*, 55, 1137±1145.