

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

WILSON JOSÉ DE OLIVEIRA

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 apresentada ao Instituto de Geociências, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciências, Área de Metalogênese.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Penteado Crósta

Este exemplar corresponde o	1
redação final da tese defendida	j
portuillan Jose de Alusia	
e aprovada pela Contissão Julgadora	Į
em <u>23/(P6/3)</u> /	
J.M.	h
VORIENTADOR	-

CAMPINAS - SÃO PAULO

JUNHO - 1998

OL4d	;
3521	2/BC

-1



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

WILSON JOSÉ DE OLIVEIRA

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 apresentada ao Instituto de Geociências, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciências, Área de Metalogênese.

UN VARA

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta - IG / UNICAMP Co-Orientador: Prof Dr. Fernando Flecha Alkmim - DEGEO / UFOP

CAMPINAS - SÃO PAULO

JUNHO - 1998



см-00117441-8

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DO I.G. - UNICAMP

Oliveira, Wilson José de OL4e 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 / Wilson José de Oliveira.- Campinas, SP.: [s.n.], 1998. Orientador: Álvaro Penteado Crósta Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências 1. Sensoriamento Remoto. 2. * Espectrometria de Reflectância. 3. *Hidrocarbonetos Gasosos. 4.Geoquímica. 5. Geologia Estrutural. I. Crósta, Álvaro Penteado. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

AUTOR: Wilson José de Oliveira

TÍTULO DA TESE: 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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta **CO-ORIENTADOR**: Prof. Dr. Fernando Flecha Alkmim

Aprovada em://
PRESIDENTE: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta
EXAMINADORES:
Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta
Prof. Dr. Gilberto Amaral
Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha
Dr. Fernando Pellon de Miranda Julyando Villan de Juda.
Dr. Yosio Edemir Shimamukuru
Campinas, 29 de junho de 1998

"Se não houver folhas, valeu a beleza das flores. Se não houver flores, valeu a sombra das folhas. Se não houver folhas, valeu a intenção das sementes."...

Henfil

ŧ

Dedico esta tese às minhas filhas Mariana, Júlia e Lorena; e ao *espírito* do meu pai, Wilson Alves de Oliveira. Agradeço a todas as entidades e pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e, em especial:

- À PETROBRAS pela oportunidade proporcionada

- Ao Instituto de Geociências da UNICAMP que, através do Departamento de Metalogênese, aceitou o projeto de pesquisa, oferecendo condições e estrutura necessária para o seu desenvolvimento.

- Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) que proporcionou condições adequadas para o bom andamento do experimento.

- Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela ação facilitadora nos trabalhos de programação, aquisição e análise dos dados radiométricos.

- À Força Aérea Brasileira e aos oficiais que participaram da campanha de aquisição dos dados espectrais da floresta de eucaliptos.

- À Gerência de Vendas de Gás Sul da PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A., pelo fornecimento e abastecimento dos feixes de cilindros de gás utilizados no experimento.

- Ao CENPES pelas análises realizadas nos laboratórios do Centro de Excelência em Geoquímica (CEGEQ), da Divisão de Química (DIQUIM) e da Divisão de Geologia de Reservatórios (DIGER).

- Ao orientador e amigo, Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta, pelo incentivo, contribuições e discussões feitas durante o período desta pesquisa.

- Ao co-orientador Prof. Dr. Fernando Flecha Alkmim (UFOP-DEGEO), pelas discussões realizadas.

- Ao Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves (USP-ESALQ), pelas discussões e sugestões à respeito do experimento.

- Ao Dr. Flávio Jorge Ponsoni (INPE) pela ação conjunta nas etapas de campo e de laboratório da pesquisa e também pelo companheirismo demonstrado.

- Aos doutores, Yosio Edemir Shimabukuru (INPE), David Chung Liang Lee (INPE), Jurandir Zullo Júnior (UNICAMP-CEPAGRI) e Rubens Augusto Camargo Lamparelli (UNICAMP-CEPAGRI), pelas valiosas contribuições.

- Ao amigo Oscar Paulo Gross Braun pelo incentivo inicial.

- Ao amigo Guy Gomes Siegel pela credibilidade e empenho no processo de seleção interna da PETROBRAS.

- Aos técnicos e amigos do IPEF, José Amarildo da Fonseca e Peterson Roberto Daroz, pelos valiosos serviços prestados durante o experimento.

- \hat{A} Dra. Nancy M. Milton (USGS) pelas análises espectrométricas das amostras de solo.

- Aos amigos da PETROBRAS Nelson Adão Babinski e Regina Célia R. dos Santos (CENPES/CEGEQ) pelas discussões e empenho demonstrados durante as etapas de análise microbiológica das amostras de solo.

- Ao amigo Rubens Vargas Filho pelo auxílio nas etapas de aquisição e tratamento dos dados florestais de campo.

- Ao técnico José Carlos Moura da Costa - Zequinha (CENPES) pela ajuda e orientação na obtenção das medidas de potencial redox do solo.

- Aos professores e funcionários do Instituto de Geociências da UNICAMP pela acolhida e atenção durante o curso de pós-graduação, em especial à Prof. Dra. Elisabete Pascholati e aos Profs. Drs. Gilberto Amaral, Ardemirio Barros Silva, Carlos Roberto S. Filho, Alfonso Schrank e Asit Choudhuri. À Valdirene Pinotti pelo carinho e atenção, e Angela, Juarez Costa e Anibal.

- Aos analistas de sistemas Patrícia C. Leite e Moacir A. Cornetti, pelos "helps" quase que constantes.

- Aos amigos: Enrico Campos Pedroso, Henrique L. Roig, Júlio César P. Valente, Gilberto Luis Sanches Hernandes, Marcelo A. Braghin, Mônica Takako Shimabukuru, Cristina Bicho, Silvia Rolim, Maria Irian de Mascena Duarte, Ricardo Aurelio Albernaz Hortensi (Blau Blau), Dailto Silva, Ronaldo Mincato e demais colegas pelo companheirismo e pelos bons momentos de convivência. Aos amigos Enrico, Blau Blau e Irian, o muito obrigado pela ajuda prestada no final do trabalho.

- Aos gerentes da PETROBRAS que acompanharam de perto os períodos em que estive afastado do trabalho para a realização deste estudo. Aos gerentes Egon Manfred Meister, Pedro Victor Zalán, Renato Sena, Sérgio Michelucci e José Renato Ferreira de Almeida, o meu sincero agradecimento.

- Aos meus pais pelo carinho e apoio durante o período que estive em Americana.

- E, de uma forma muito especial, o meu sincero reconhecimento pelo carinho, paciência e compreensão demonstrados pela Sônia. À minha esposa, o meu muitíssimo obrigado!!

SUMÁRIO

i

i.

EPÍGRAFE	
DEDICATÓRIA	
AGRADECIMENTOS	
SUMÁRIO	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	<u></u>
LISTA DE TABELAS	
RESUMO	
ABSTRACT	
Capítulo 1. Introdução – Objetivos – A área de estudo	
1.1. Introdução	·····
1.2. Objetivos	urmenter
1.3. A área de estudo	

1.3.1. Localização da área de estudo	5
1.3.2. Aspectos fisiográficos da área de estudo	5
1.3.2.1. Relevo	5
1.3.2.2. Solos	7
1.3.2.3. Clima	10
1.3.2.4. Vegetação	11

Capítulo 2. Aspectos geológicos regionais da bacia do São Francisco, exsudações de hidrocarbonetos gasosos e o uso do sensoriamento remoto

na detecção de hidrocarbonetos em superfície – Uma revisão_____ 15 2.1. Exploração de hidrocarbonetos na bacia do São Francisco_____ 15 2.2. Geologia regional 17 2.2.1. Aspectos tectono-estruturais da porção sul do Cráton do São Francisco_____ 18 2.2.1.1. O arcabouço estrutural do domínio I 19 2.2.1.2. O compartimento W – Porção externa da Faixa Brasília_____ 19 2.2.1.3. O compartimento E – Porção externa da Faixa Araçuaí 22 23 2.2.1.4. O compartimento central_____

2.2.2. Considerações adicionais sobre os aspectos tectono-estruturais
2.2.3. O Grupo Bambuí
2.2.3.1. Evolução dos conceitos estratigráficos
2.2.3.2. Ambiente deposicional
2.2.3.3. Cronologia do Grupo Bambuí
2.3. Exsudações de hidrocarbonetos gasosos
2.4. Alteração geoquímica dos solos causada pela presença de hidrocarbonetos gasosos
2.5. Efeitos dos hidrocarbonetos gasosos nas plantas
2.6. O uso do sensoriamento remoto na detecção de hidrocarbonetos em superfície
2.7. Comportamento espectral do solo e da vegetação
Capítulo 3. Materiais utilizados e metodologia de trabalho
3.1. Materiais utilizados
3.2. Metodologia de trabalho
3.2.1. Constatações preliminares de campo
3.2.2. Exsudações de gás da região do Remanso do Fogo e a geoquímica
hidrocarbonetos gasosos
3.2.3. O uso das imagens LANDSAT TM
3.2.3.1. Informações estatísticas das imagens
3.2.3.2. Correção dos efeitos atmosféricos
.3.2.3.3. Correção geométrica
3.2.4. Integração das imagens LANDSAT TM com os dados de geoquímica
superfície
3.2.5. Integração dos mapas de hidrocarbonetos gasosos através de composiç
colorida RGB
3.2.6. Aplicação do índice normalizado de diferenca de vegetação (NDVI) à área
plantio de eucaliptos
3.2.7 Aplicação de Apálise por Principais Componentes (APC) no realce de feiçã
5.2.7. Aplicação de Analise por l'Interpais componentes (AI C) no realec de reiçe
3.2.8. Analise espectral das amostras de solos e do dossel da floresta de eucaliptos
3.2.8.1. Analise espectral das amostras de solos
3.2.8.2. Analise espectral do dossel da floresta de eucaliptos

3.2.8.2.1. Sistema de aquisição de dados aerotransportado (SADA)
3.2.8.2.2. Medições radiométricas com o SADA
3.2.9. Fatores de reflectância aparente obtidos da imagem LANDSAT TM
3.2.10. Levantamento dos parâmetros biométricos da vegetação, estimativa dos
índices de área foliar e as estimativas dos índices normalizados de diferença de
vegetação
3.2.11. Levantamento de informações geológicas da área de estudo - Uma
abordagem estrutural
3.2.12. Efeito do fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos em amostras de solo e
vegetação
3.2.12.1. Etapas do experimento
Capítulo 4. Apresentação dos resultados
4.1. Integração das imagens LANDSAT TM com os dados de geoquímica de superfície
4.2. Integração dos mapas de hidrocarbonetos gasosos através de composiçao colorida
RGB
4.3. Aplicação do índice normalizado de diferença de vegetação (NDVI) à área de
plantio de eucaliptos
4.4. Aplicação de análise por principais componentes (APC) no realce de feições
associadas às emanações de hidrocarbonetos
4.5. Análise espectral de amostras de solos
4.6. Análise espectral do dossel da floresta de eucaliptos através do SADA - curvas dos
fatores de reflectância e as simulações das bandas do LANDSAT TM
4.7. Os fatores de reflectância aparente médios (FRAM) obtidos da imagem LANDSAT
TM
4.8. Levantamento dos parâmetros biométricos da vegetação, estimativas do índice de
área foliar (IAF) e estimativas dos índices normalizados de diferença de vegetação (NDVI)
4.9. Levantamento de informações geológicas da área de estudo – Uma abordagem
estrutural
4 9 1 Aspectos geológicos
4.9.2. Mana de Anomalia Bouguer
4.9.3. Sísmica de reflexão

ł

)

ł

)

١

)

i

ł

)

4.9.4. Levantamento dos elementos estruturais de campo
4.10. Resultados do experimento do fluxo forçado de gasosos em amostras de solo e
vegetação
4.10.1. Efeito dos hidrocarbonetos gasosos sobre o crescimento das plantas
4.10.2. Efeito dos hidrocarbonetos gasosos no potencial redox do solo
4.10.3. Efeito dos hidrocarbonetos gasosos nas características físicas dos solos
4.10.3.1. Mineralogia total e mineralogia de argilas
4.10.3.2. Coloração dos solos
4.10.4. Efeito dos hidrocarbonetos gasosos nas características químicas dos solos
4.10.5. Efeito dos hidrocarbonetos gasosos na vegetação
4.10.5.1. Análise química da vegetação
4.10.5.2. Análise do peso seco da vegetação
4.10.5.3. Absorção de nutrientes
4.10.6. Análise microbiológica de amostras de solo
4.10.6.1. Amostragem e procedimentos analíticos
4.10.6.2. Análise dos resultados
4.10.7. Levantamento das curvas espectrais da vegetação e do solo
4.10.7.1. Levantamento das curvas espectrais da vegetação
4.10.7.2. Levantamento das curvas espectrais do solo
Capítulo 5. Discussão dos resultados
Capítulo 6. Conclusões e considerações finais
Referências Bibliográficas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da área de estudo.	6
Figura 1.2 – Composição física média da cobertura arenosa da área de estudo.	9
Figura 1.3 – Área de estudo inserida nos mapas de precipitação de Minas Gerais.	12
Figura 1.4 – Área de estudo inserida nos mapas de temperatura média do ar.	12
Figura 1.5 – Área de estudo inserida nos mapas de radiação solar incidente.	12
Figura 2.1- Domínios estruturais do Cráton São Francisco e sua compartimentação.	20
Figura 2.2 - Mapa foto-estrutural.	25
Figura 2.3 - Quadro de colunas estratigraficas.	27
Figura 2.4 – Coluna estratigráfica para o Supergrupo São Francisco em Minas Gerais.	33
Figura 2.5 – Comportamento espectral dos óxidos e hidróxidos de ferro.	51
Figura 2.6 - Curvas espectrais características dos argilo-minerais.	51
Figura 2.7 – Curvas de comportamento espectral de folhas de diferentes colorações	51
Figura 3.1 – Materiais utilizados no experimento.	54
Figura 3.2 - Aspecto da plantação de eucaliptos com 2 anos de idade localizada dentro da área de influência dos hidrocarbonetos gasosos.	56
Figura 3.3 - Aspecto da plantação de eucaliptos com dois anos de idade localizada fora da área de influência dos hidrocarbonetos gasosos.	56
Figura 3.4 - Folhas de eucaliptos coletadas dentro das áreas de influência dos hidrocarbonetos gasosos comparadas com uma folha sadia.	58
Figura 3.5 - Folha de eucaliptos coletada dentro de área de influência dos	
hidrocarbonetos gasosos comparada com uma folha sadia. A coloração arroxeada é indicativa de deficiência nutricional	58
Figura 3.6 - Aspecto superficial do solo de coloração acinzentada situado em área de influência dos hidrocarbonetos gasosos.	59
Figura 3.7 - Aspecto superficial do solo de coloração marrom-avermelhado situado em área fora da influência dos hidrocarbonetos gasosos.	59

Figura 3.8 - Aspecto da emanação de gás existente na margem do Rio Paracatu.	61
Figura 3.9 - Poço do Jacarezinho mostrando o borbulhamento de gás.	61
Figura 3.10 - Índices de vazões medidos nas áreas de exsudações.	64
Figura 3.11 - Mapa dos pontos de amostragem geoquímica de solos para quantificação dos hidrocarbonetos gasosos.	65
Figura 3.12 – Curvas de iso-valores padronizados de metano, etano e de hidrocarbonetos mais pesados que o etano.	66
Figura 3.13 – Componentes do SADA.	81
Figura 3.14 – Detalhe do acoplamento do SADA no helicóptero da FAB.	81
Figura 3.15 – SPECTRON SE-590 coletando dados radiométricos.	82
Figura 3.16 – Trabalho de inventário florestal.	87
Figura 3.17 – LAI-2000 sendo utilizado na medição da incidência de radiação eletromagnética difusa no interior do dossel da floresta de eucaliptos.	87
Figura 3.18 - Coleta de solo para o experimento na região do Remanso do Fogo.	92
Figura 3.19 – Aspecto interno da casa de vegetação do IPEF.	92
Figura 3.20 – Detalhe do recipiente e do prato plástico perfurado com os parafusos de latão vazado.	93
Figura 3.21 – Detalhe do sistema de injeção de gás.	93
Figura 3.22 – Aspecto interno da base do recipiente utilizado no experimento.	94
Figura 3.23 – Aspecto interno do recipiente utilizado no experimento.	94
Figura 3.24 - Vista externa da casa de vegetação do IPEF.	96
Figura 3.25 - Vista de uma das mesas onde foi montado o experimento	96
Figura 3.26 – Detalhe do experimento	97
Figura 3.27 - Detalhe de um dos erlenmayers do experimento.	97
Figura 3.28 - Detalhe do registro de gás	98
Figura 3.29 - Válvula de alívio de pressão acoplada no feixe de cilindros de gás.	99
Figura 3.30 - Detalhe da válvula de alívio de pressão com os manômetros.	99

١

)

ł

l

I

I.

Figura 4.1 - Curvas de concentração de gás integradas a imagem LANDSAT TM.	104
Figura 4.2 - Imagens em níveis de cinza dos gases.	105
Figura 4.3 – Composiçao colorida RGB formada pelas imagens de metano (RED), etano (GREEN) e HCs mais pesados que etano (BLUE).	106
Figura 4.4 - Índice Normalizado de Diferença de Vegetação (NDVI) aplicado à imagem LANDSAT TM de 24/05/1994.	108
Figura 4.5 - Clareira de formato circular existente dentro da floresta de eucaliptos.	109
Figura 4.6 - Imagens geradas pela APC.	112
Figura 4.7 – Pontos de coletas de solos para análise espectral.	114
Figura 4.8 – Curvas espectrais de amostras de solos.	115
Figura 4.9 – Pontos de coletas de informações radiométricas pelo SADA.	116
Figura 4.10 – Curvas espectrais dos dosséis da floresta de eucaliptos obtidas pelo SADA.	117
Figura 4.11 - Curvas espectrais dos dosséis da floresta de eucaliptos obtidas pelo SADA.	118
Figura 4.12 – Vista aérea do dossel da floresta de eucaliptos (ponto 4).	120
Figura 4.13 - Vista aérea do dossel da floresta de eucaliptos (ponto 6).	120
Figura 4.14 – Simulação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM (pontos 1, 3, 4 e 6)	122
Figura 4.15 – Simulação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM (pontos 20, 22, 23 e 27)	123
Figura 4.16 – Detalhes da imagem LANDSAT TM (banda 4) transformada para níveis de reflectância aparente com o posicionamento das repetições dos pontos de amostragens feitos em cada ponto levantado pelo SADA.	124
Figura 4.17 – Representação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM na forma de FRAM para os pontos 1, 3, 4 e 5.	128
Figura 4.18 – Representação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM na forma de FRAM para os pontos 20, 22, 23 e 27.	129
Figura 4.19 - Mapa geológico da área de estudo.	132
Figura 4.20 - Mapa de Anomalia Bouguer da área de estudo.	134

i

i

Figura 4.21 – Interpretação realizada sobre a linha sísmica 240-060 que corta a área de estudo (desenho modificado e adaptado de Braun, 1997).	136
Figura 4.22 – Perfil sísmico da linha 240-060, mostrando a interpretação das falhas que cortam os sedimentos do Supergrupo Bambuí e atingem o embasamento subjacente.	137
Figura 4.23 - Mapa de localização dos pontos de coleta de informações estruturais de campo.	140
Figura 4.24 – PONTO 1. Afloramento de calcário mostrando pequenas dobras suavemente assimétricas com eixo N20E e vergência para NW.	142
Figura 4.25 – PONTO 2. Camadas de arenitos finos intensamente fraturados, indicando uma possível zona de falha de direção N50-60E.	142
Figura 4.26 – PONTO 3. Lajedos de siltitos laminados na margem do rio São Francisco, mostrando juntas de direção N55W.	143
Figura 4.27 – PONTO 5. Afloramento de siltito laminado de coloração cinza-esverdeado, mostrando planos de juntas nas direções N40-60W (à direita) e N20-30E (à esquerda).	143
Figura 4.28 – PONTO 7. Afloramento de siltito alterado com nível interestratal apresentando pequenas estruturas duplex. Planos de falha com direção N70W, mergulhando 25 graus para NE.	145
Figura 4.29 – PONTO 7. Siltito alterado mostrando plano de junta com estrutura plumosa na direção N30E.	145
Figura 4.30 – Estereogramas de projeção polar dos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6.	146
Figura 4.31 – Estereogramas dos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6; e do ponto 7.	147
Figura 4.32 – Mapa dos elementos estruturais da área de estudo.	148
Figura 4.33 - Mudas de eucaliptos com 3 semanas, brotadas em recipientes submetidos ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos (vazão de 15 cm ³ /min).	151
Figura 4.34 - Mudas de eucaliptos com 3 semanas, brotadas em recipiente não exposto ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos.	151
Figura 4.35 – Recipientes submetidos ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos (vazão de 15 cm ³ /min) 3 semanas após o plantio das sementes de braquiária.	152

)

i -

)

Figura 4.36 – Mudas de braquiária 3 semanas após terem sido semeadas nos recipientes	
sem a presença de fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos.	152
Figura 4.37 - Aparelho utilizados na obtenção dos valores do potencial redox dos solos	
dos recipientes.	155
Figura 4.38 – Resultado da análise microbiológica.	172
Figura 4.39 – SECTRON SE-590	175
Figura 4.40 - Curvas de comportamento espectral das folhas de eucaliptos.	177
Figura 4.41 – Exemplos dos efeitos das deficiências nutricionais constatadas nas folhas de eucaliptos e suas respectivas curvas de comportamento espectral.	178
Figura 4.42 – Curvas de comportamento espectral das folhas de gramíneas.	180
Figura 4.43 - Folhas de gramíneas coletadas do vaso 6 da mesa 1 (mesa submetida ao fluxo de 15 cm ³ /minuto de gás), 23 dias após o ínicio da injeção de gás nos recipientes.	181
Figura 4.44 - Folhas de gramíneas coletadas do vaso 28 da mesa 3 (mesa não submetida ao fluxo de gás), 23 dias após o ínicio da injeção de gás nos recipientes.	181
Figura 4.45 - Curvas de comportamento espectral média dos solos da mesa 1 (azul), mesa 2 (marrom) e mesa 3 (laranja).	183
Figura 5.1 – Vista em perspectiva da área de estudo enfatizando as áreas onde se concentram óxidos e hidróxidos de ferro carreados pelo aquífero.	186
Figura 5.2 - Mudas de eucaliptos e gramíneas 30 dias após terem sido repicadas nos vasos.	195
Figura 5.3 - Mudas de eucaliptos e gramíneas 70 dias após terem sido repicagem nos vasos.	195
Figura 5.4 – Eucaliptos e gramíneas com 5 meses de idade durante a fase de injeção dos hidrocarbonetos gasosos.	196
Figura 5.5 - Folhas em estado de senescência precoce na porção basal dos eucaliptos plantados nos vasos submetido ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos.	197
Figura 5.6 - Sintoma de deficiência em cálcio e nitrogênio	199
Figura 5.7 – Sintoma de deficiência em cálcio e nitrogênio.	199

Figura 5.8 - Folha sadia de eucalipto plantada em vaso sem a presença dos hidrocarbonetos gasosos.	200
Figura 5.9 - Folha de eucalipto plantado em vaso submetido ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos.	200
Figura 5.10 - Folha de eucalipto mostrando sinais de deficiência em nitrigênio.	201
Figura 5.11 - Folhas de eucaliptos apresentando sintoma avançado de deficiência em nitrogênio, associado à sinais de deficiência em fósforo.	201
Figura 5.12 - Folha de eucalipto mostrando sinais de deficiência em fósforo.	202
Figura 5.13 - Folha de eucalipto mostrando, simultaneamente, sintomas de deficiência em fósforo e nitrogênio.	203
Figura 5.14 - Folhas de eucaliptos mostrando sintomas conjuntos de deficiência em potássio, fósforo e nitrogênio.	203
Figura 5.15 - Folhas sadias de eucaliptos plantados nos vasos não submetidos à presença de hidrocarbonetos gasosos.	204
Figura 5.16 – Aspecto geral dos eucaliptos submetidos ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos, no final do experimento.	206
Figura 5.17 – Aspecto geral dos eucaliptos que não foram submetidos à presença dos HCs gasosos, no período final do experimento.	206
Figura 5.18 – Comparação das raízes dos eucaliptos retirados dos recipientes do experimento.	207
Figura 5.19 – Aspecto das gramíneas plantadas nos vasos não submetidos à presença de HCs gasosos.	208
Figura 5.20 – Aspecto das gramíneas plantadas nos vasos submetidos à presença de HCs gasosos.	208

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
HCs	Hidrocarbonetos
LANDSAT	Land Satellite
TM	Thematic Mapper
MSS	Multi-Spectral Scanner
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
IEF	Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais
VIS	Visible
NIR	Near Infrared
VNIR	Visible and Near Infrared
SWIR	Small Wave Infrared
EEM	Espectro Eletromagnético
TMS	Thematic Mapper Simulator
ATM	Airborne Thematic Mapper
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello
SGE	Serviço Geográfico do Exército
SADA	Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado
C1	Metano
C2	Etano
C2+	Hidrocarbonetos mais pesados que o etano
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra Seca
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
DNs	Digital Numbers
UTM	Universo Transverso de Mercator
NDVI	Índice Normalizado de Diferença de Vegetação
RGB	Composição Colorida <i>Red Green Blue</i>
APC	Análise por Principais Componentes
FPCS	Feature Oriented Principal Component
IFOV	Instantaneous Field of View
IAF	Índice de Área Foliar
LAI	Leaf Area Index
IPEF	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
ESALQ	Escola Superior de Agricultura "Luíz de Queiroz"
GNV	Gás Natural para Veículo
FRA	Fator de Reflectância Aparente
FRAM	Fator de Reflectância Aparente Médio
E _H	Potencial Redox
CEGEQ	Centro de Excelência em Geoquímica do CENPES

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Análise composicional das esxudações	62
Tabela 3.2 – Análise dos gases do poço Jacarezinho	62
Tabela 3.3 – Imagens LANDSAT TM utilizadas	67
Tabela 3.4 – Estatística das cenas 13/06/1984, 01/08/1990, 24/05/1994 e 12/06/1995	69
Tabela 3.5 – Valores de DNs utilizados na correção do espalhamento atmosférico	71
Tabela 3.6 – Relação dos pontos de controle utilizados	73
Tabela 3.7 – Erros médios quadráticos obtidos pelo geo-referenciamento	73
Tabela 3.8 – Fatores de calibração do LANDSAT TM	85
Tabela 3.9 – Quadro de atividades realizadas durante o experimento	102
Tabela 4.1 – Matriz de auto-vetores TM1, TM3, TM4 e TM5 – 01/06/1990	
Tabela 4.2 – Matriz de auto-vetores TM1, TM3, TM4 e TM5 – 24/05/1994	111
Tabela 4.3 – Matriz de auto-vetores TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 –13/06/1984	111
Tabela 4.4 – Pontos selecionados para análise espectral	119
Tabela 4.5 – Fatores de reflectância aparente – banda 1	125
Tabela 4.6 – Fatores de reflectância aparente – banda 2	125
Tabela 4.7 – Fatores de reflectância aparente – banda3	126
Tabela 4.8 – Fatores de reflectância aparente – banda 4	126
Tabela 4.9 – Parâmetros biométricos da vegetação – NDVI (SADA) – NDVI (FRAM)	
e Índice de Área Foliar (IAF)	130
Tabela 4.10 – Percentuais de germinação das sementes plantadas	150

Tabela 4.11 – Potencial redox dos solos do experimento	156
Tabela 4.12 – Mineralogia total	157
Tabela 4.13 – Coloração do solo	158
Tabela 4.14 – Analíse de fertilidade dos solos	159
Tabela 4.15 – Análise química da vegetação – folhas de eucaliptos	163
Tabela 4.16 – Análise química da vegetação – ramos e caules de eucaliptos	164
Tabela 4.17 – Análise química da vegetação – raízes de eucaliptos	164
Tabela 4.18 – Análise química da vegetação – braquiária	165
Tabela 4.19 – Análise do peso seco – folhas, ramos e caules e raízes de eucaliptos	166
Tabela 4.20 – Análise peso seco – porção aérea das gramíneas	166
Tabela 4.21 – Quantidade de nutrientes absorvidos – folhas de eucaliptos	167
Tabela 4.22 – Quantidade de nutrientes absorvidos – ramos e caules de eucaliptos	167
Tabela 4.23 – Quantidade de nutrientes absorvidos – raízes de eucaliptos	168
Tabela 4.24 – Quantidade de nutrientes absorvidos – folhas, ramos e caules e raízes de	
eucaliptos	168
Tabela 4.25 – Quantidade de nutrientes absorvidos – gramínea (porção aérea)	169
Tabela 4.26 – Análise microbiológica de amostras de solos	171



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

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

RESUMO

TESE DE DOUTORADO

Wilson José de Oliveira

Mapas de iso-concentração de hidrocarbonetos gasosos, juntamente com dados de levantamento espectral aéreo e terrestre, foram integrados a imagens do LANDSAT 5 TM com o objetivo de estudar as emanações naturais de gás existente numa região conhecida como Remanso do Fogo, localizada no interior da Bacia Proterozóica do São Francisco, no norte do Estado de Minas Gerais. Técnicas de realce aplicadas em imagens digitais mostraram a existência de anomalias espectrais relacionadas a diferenças de coloração dos solos e diferenças na densidade da cobertura vegetal, dentro de uma área de plantio de eucaliptos. A análise geoquímica de amostras de solo mostra, em alguns casos, a correlação espacial entre a elevada concentração de hidrocarbonetos gasosos e as anomalias do TM. Informações de campo comprovam que as anomalias espectrais identificadas encontram-se relacionadas à existência de áreas onde os eucaliptos encontram-se pouco desenvolvidos mostrando claros sinais de deficiência nutricional. Além disto, solos localizados dentro das áreas de anomalias geoquímicas de hidrocarbonetos apresentam uma coloração cinza, diferente da coloração marrom avermelhado dos solos posicionados fora das áreas de anomalias. Curvas espectrais de amostras de solo, coletadas dentro e fora das anomalias geoquímicas de hidrocarbonetos comprovam estas diferenças. Da mesma forma, obteve-se dados espectrais utilizando-se um sistema aerotransportado (SADA) operante no intervalo entre 400 e 1100 nm. A integração destes dados de natureza distinta revela a presença de feições diferenciadas de solo e vegetação, causadas provavelmente pela ocorrência dos hidrocarbonetos gasosos. A interpretação dos elementos estruturais de campo e do perfil sísmico de reflexão demonstraram que o sistema de falhas inversas contrend N30-40E e o sistema de juntas (N30E e N40-60W) controlam as emanações de hidrocarbonetos gasosos. A fim de melhor investigar este fenômeno e objetivando-se obter o melhor entendimento dos efeitos causados pelos hidrocarbonetos gasosos no solo e na vegetação, foi desenvolvido um experimento em condições de casa de vegetação. Três conjuntos de vasos contendo solos coletados na área de estudo e duas espéciesforam usadas como plantas indicadoras (Eucaliptus camaldulenses e Braquiária decumbens). Hidrocarbonetos gasosos foram injetados continuamente durante o experimento em um período de oito semanas em dois conjuntos de vasos. O terceiro conjunto de vasos, não afetado pela injeção do gas, foi utilizado para comparação no decorrer do experimento. As características físicas, químicas e radiométricas dos solos e vegetação foram quantificadas e avaliadas para todos os conjuntos de vasos. Medidas radiométricas da vegetação foram realizadas periodicamente através do espectroradiomêtro portátil Spectron SE-590, operante na faixa entre 400 e 1100 nm do espectro eletromagnético. A presença dos hidrocarbonetos gasosos no sistema causou mudança nos padrões espectraise químicos da vegetação devido a deficiências nutricionais comprovadas. As curvas espectrais das folhas de eucalipto e da gramínea demonstraram um aumento do albedo nas faixas do visível e infravermelho próximo. Observou-se uma migração do gradiente abrupto da curva espectral da vegetação (red edge) em direção a comprimentos de onda inferiores (blue shift). Mudanças no conteúdo relativo dos nutrientes, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, zinco e ferro, resultaram em mudanças de coloração das folhas. O hidrocarboneto gasoso também modificou as características espectrais dos solos, que demonstraram um decréscimo do albedo acima dos 550 nm. Tal fato é corroborado pela coloração do solo observada variando de tons de marrom amarelado do solo original para tons de marrom nos solos injetados com hidrocarbonetos gasosos. Interpretou-se estas mudanças cromáticas como uma indicação da mudança química evidenciada pela redução do Fe^{+3} para Fe^{+2} .



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

CHARACTERIZATION OF HYDROCARBON GAS SEEPAGE IN THE REMANSO DO FOGO REGION (MINAS GERAIS STATE, BRAZIL), THROUGH THE INTEGRATION OF REMOTE SENSING, GEOCHEMISTRY, GEOPHYSICS, STRUCTURAL GEOLOGY AND REFLECTANCE SPECTROMETRY DATA

ABSTRACT

DOCTORATE THESIS

Wilson José de Oliveira

Hydrocarbon soil geochemistry and airborne spectrometry survey were integrated with Landsat Thematic Mapper - LANDSAT 5 TM - imagery for an area known as Remanso do Fogo, located in a portion of the São Francisco basin in Central Brazil, where hydrocarbon seeps were previously known. Digital image enhancement allowed the identification of spectrally anomalous areas related to different soil color and geobotanical anomalies within an extensive eucalyptus plantation. Soil geochemistry showed, in some places, spatial correlation between high levels of gaseous hydrocarbons and TM anomalies. Field checking of these anomalies revealed that eucalyptus specimens in the anomalous areas were poorly developed, showing clear signs of nutritional deficiency. Furthermore, soils from sites corresponding to geochemical anomalies had a distinctive gray color differing from the usual brownish-red color of surrounding superficial soils. Reflectance spectra were measured for soil samples from the anomalous and non-anomalous area and showed differences. Spectral data were collected over anomalous and non-anomalous eucalyptus stands, using an airborne system operating between 400 and 1100 nm. The integration of these different data sets reveals the presence of a significant combined soil-vegetation anomaly, caused probably by long-term hydrocarbon gas seepage. The interpretation of field structural data and reflection seismic profiles shows that N30-40Etrending thrust faults and two joint systems (N30E and N40-60W) control hydrocarbon gas seepage. To further investigate the phenomena and to understand the effects of hydrocarbon gas in soils and vegetation, we devised an environment-controlled (greenhouse) experiment. Three sets of vessels containing soil collected in the study area and two different vegetation assemblages (Eucalyptus camaldulenses and Braquiaria decumbens) were used. Hydrocarbon gas was injected continuously throughout the experiment (8 weeks) into two sets of vessels. The third set of vessels, in which no gas was injected, was used for comparison throughout the experiment. Physical, chemical and radiometric characteristics of soils and vegetation (leaves) were measured and evaluated for both sets. Radiometric measurements on vegetation were made periodically using a Spectron SE-590 handheld radiometer, operating in the 400 to 1,100 nm range. The presence of hydrocarbon gas caused changes on the spectral and chemical patterns of the vegetation due to nutritional deficiencies. Spectral curves of eucalyptus and grass leaves showed an overall increase in albedo within the visible and near infrared range. A shift of the vegetation red edge towards smaller wavelengths has been observed (the "blue shift"). Changes on the relative content of nutrients such as nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, zinc and iron was also detected, which resulted in chlorosis of the leaves. Hydrocarbon gas also modified the spectral characteristics of the soils, which showed a decrease inalbedo above the 550-nm region. The fact is supported by the observed soil color changes, ranging from vellowish-brown tones in the original soils to brown tones in the gas-injected soils. We interpret this as an indication of chemical modification of the Fe^{3+} , which have been reduced to Fe^{2+} .

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO – OBJETIVOS – A ÁREA DE ESTUDO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO - OBJETIVOS - A ÁREA DE ESTUDO

1.1 - INTRODUÇÃO

Comparadas com as diversas ferramentas utilizadas na exploração petrolífera em território brasileiro, pode-se dizer que as imagens de sensoriamento remoto são ainda empregadas de forma bastante restrita, sendo consideradas secundárias quando comparadas, por exemplo, com a sísmica de reflexão e com os métodos potenciais (e.g. aeromagnetometria e gravimetria). Imprescindíveis aos trabalhos de exploração *offshore*, a sísmica de reflexão e os métodos potenciais obtiveram, a partir da década de 70, uma posição de acentuado destaque, propiciando aos outros métodos um certo desprestígio, mesmo nas áreas de exploração terrestre.

Embora sempre empregados nos trabalhos de exploração das bacias interiores, alguns produtos de sensoriamento remoto (fotografias aéreas e imagens de satélites) são, na maioria das vezes, subutilizados, servindo apenas como mera representação pictórica de áreas com interesse geológico ou como base cartográfica para planejamento de atividades de campo.

Na maioria das vezes, a extração de informações estruturais e espectrais do terreno através da utilização de imagens orbitais é prejudicada pela grande diversidade de aspectos fisiográficos, característicos das superficies das bacias sedimentares brasileiras. As extensas áreas de cobertura vegetal, associadas ao espesso manto intempérico que cobre grande parte das bacias do nosso país, atuam como fatores negativos, dificultando a obtenção de informações geológicas.

No entanto, em áreas portadoras de condições fisiográficas favoráveis, as imagens de satélites apresentam-se como importante fonte de informações, podendo direcionar os esforços despendidos nas várias etapas da exploração petrolífera, otimizando tempo e recursos financeiros. Quando empregados de forma correta, os produtos de sensoriamento remoto,

1

além de informações estruturais, podem fornecer outras importantes informações relacionadas à presença de recursos minerais em superfície. Em alguns casos, esses produtos permitem a identificação, por exemplo, de minerais ou grupos de minerais relacionados à existência de mineralizações em sub-superfície.

Nos últimos anos, técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas como ferramentas de exploração de metais preciosos, metais ferrosos e não-ferrosos, minerais radioativos e hidrocarbonetos (**HCs**).

A presença de concentrações anômalas de HCs (seja na forma líquida ou gasosa) em superficie ou imediatamente abaixo dela, detectada visualmente ou através de levantamentos geoquímicos, pode ser um importante indicativo do potencial petrolífero de uma bacia sedimentar. Quando associadas a informações geológicas de superficie (informações estruturais, por exemplo), as exsudações de HCs podem direcionar campanhas geofísicas ou ainda ajudar na locação de poços de petróleo.

Mesmo tendo um papel importante no processo exploratório, as campanhas geoquímicas para detecção de HCs em superficie não conseguem cobrir extensas áreas em curtos períodos de tempo. Os resultados obtidos são altamente dependentes do espaçamento do *grid* de amostragem que, em função da malha utilizada, pode não contemplar os pontos de exsudações, uma vez que estas são localizadas e de pequenas dimensões na maioria das vezes.

Concentrações anômalas de HCs gasosos no terreno afetam a composição química dos solos onde ocorrem, podendo imprimir mudanças nas características das rochas, dos solos (Donovan, 1974; Donovan *et al.*, 1981 *apud* Roberts, 1986) e, conseqüentemente, também na cobertura vegetal (Dalziel & Donovan, 1981; Rock, 1984; Lang *et al.*, 1985a *apud* Roberts, 1986). Tais mudanças, por sua vez, expressar-se-iam superficialmente como feições fora dos padrões normais, tanto nas características físicas e químicas de rochas e solos (e.g. mudanças mineralógicas e de cor), como também na vegetação (deficiências nutricionais e problemas estruturais de formação).

Segundo Roberts (1986), os dados de sensoriamento remoto podem constituir um meio eficaz e eficiente de discriminação superficial das anomalias associadas à vazamentos de HCs, desde que devidamente utilizados.

A hipótese hoje comumente aceita sobre a origem orgânica do petróleo e a crescente constatação da presença de fósseis Pré-cambrianos - pertencentes a estratos sedimentares, cujos teores de carbono orgânico são em muitos casos compatíveis com os de seções geradoras clássicas (Murray, 1980 e Jackson, 1988) - têm despertado a atenção de geocientistas da PETROBRAS para bacias mais antigas em território brasileiro. A descoberta de inúmeras ocorrências de HCs gasosos na Bacia Proterozóica do São Francisco e as notícias de produção de gás e óleo de origem Pré-cambriana no Campo de Markovo, Bacia de Tunguska (Sibéria), assim como a produção em pequena escala em bacias similares no Omã, China, Austrália, Paquistão e Estados Unidos, levaram a PETROBRAS a desenvolver uma estratégia de exploração para esta bacia.

Além dos trabalhos rotineiros de exploração que vêm sendo desenvolvidos, a vasta extensão areal da bacia (aspecto que determina a necessidade da realização de atividades em várias escalas de trabalho) e a existência de condições fisiográficas propícias (Braun, 1982) contribuíram para a utilização de produtos de sensoriamento remoto no mapeamento geológico de superfície, no planejamento de levantamentos sísmicos e de métodos potenciais (gravimetria e magneto-telúrico), e na tentativa de identificação das alterações causadas pela presença de HCs gasosos em superfície. O enfoque principal desta dissertação consistirá neste último aspecto.

1.2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal a investigação das alterações superficiais causadas pela existência de emanações naturais de HCs gasosos na região do Remanso do Fogo - MG. Para atingir este objetivo foram definidas as seguintes atividades:

 Integração de dados de sensoriamento remoto (imagens LANDSAT 5 - Thematic Mapper) e geoquímica de superfície (curvas de distribuição padronizada de teores de HCs gasosos), com o intuito de direcionar a identificação de áreas submetidas à influência das exsudações de gases termoquímicos ;

- Aplicação de técnicas de processamento digital sobre as imagens multiespectrais LANDSAT 5 TM, de modo a realçar e melhor discriminar as prováveis feições superficiais de interesse ("anomalias"), tanto do solo como da cobertura vegetal (floresta de eucaliptos) existentes nos locais com concentrações anômalas de HCs gasosos;
- Estudo das características espectrais das anomalias através de levantamento de curvas de comportamento espectral dos solos e do dossel da floresta de eucaliptos, dentro e fora das áreas de influência das emanações gasosas de HCs ;
- Levantamento de dados biométricos da floresta de eucaliptos, com o objetivo de estimar a variação da densidade da cobertura vegetal causada pela presença dos HCs ;
- Obtenção de informações estruturais de superfície e subsuperfície com base na interpretação de imagens de satélite, de dados sísmicos, gravimétricos e trabalhos de campo, na tentativa de explicar a existência das emanações naturais de HCs na região do Remanso do Fogo;
- Simulação em ambiente controlado (casa de vegetação) do vazamento de gás em recipientes contendo solo e vegetação (eucaliptos e gramíneas) para posterior estudo de suas características espectrais; este experimento visa avaliar o comportamento espectral do solo e da vegetação, assim como as variações físicas, químicas e biológicas (no caso da vegetação), sob a influência de emanações de HCs gasosos;
- Comparação entre as informações espectrais obtidas nos vários níveis dos levantamentos realizados (orbital, aero-transportado e em laboratório) com o objetivo de estipular parâmetros de comportamento espectral do solo e da vegetação para aplicação nas atividades de exploração de HCs nas bacias sedimentares.

1.3 - A ÁREA DE ESTUDO

1.3.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na porção central da Bacia do São Francisco e compreende a região da confluência dos rios São Francisco e Paracatu, nas imediações da localidade denominada Cachoeira do Manteiga, Município de Buritizeiro, Estado de Minas Gerais. A área, delimitada pelas coordenadas 16°35' - 16°45' de latitude sul e 45°05' - 45°10' de longitude oeste, é conhecida como Remanso do Fogo, por apresentar inúmeras emanações naturais de gás de petróleo (Figura 1.1).

1.3.2 - ASPECTOS FISIOGRÁFICOS DA ÁREA DE ESTUDO

1.3.2.1 - RELEVO

Inserida na confluência dos rios São Francisco e Paracatu, a área de estudo apresenta relevo plano, ligeiramente ondulado, mostrando suave declividade e exposição de vertente para NW, no sentido do rio Paracatu. Relevo semelhante ocorre a leste e nordeste, ao longo da margem direita do rio São Francisco. Na porção noroeste, do outro lado do rio Paracatu, também ocorrem áreas de relevo plano, diferenciando-se apenas na exposição de vertente, que neste caso mergulha para SE.

Essas superficies planas, com cotas variando de 490 a 540 metros de altitude, representam coberturas Terciárias-Quaternárias, formando patamares intermediários posicionados entre as superficies de aplainamento Sul-Americana e Velhas (Braun, 1971).

Na porção sul, em locais onde afloram os sedimentos do Grupo Bambuí, o relevo mostra-se mais dissecado, com drenagens pouco profundas e encaixadas ao longo de fraturas do terreno. Ele é caracterizado por pequenas colinas de topos convexos e encostas retilíneas suavemente côncavas, evidenciando o caráter argilo-siltoso destes sedimentos. Esses terrenos são relacionados à superficie de aplainamento do Ciclo Velhas, cujo nível de referência é representado pelas planícies aluvionares do rio São Francisco (Braun, *op. cit*).

5



Figura 1.1 - Localização da área de estudo dentro do contexto da Bacia do São Francisco. A região encontra-se inserida nas proximidades da confluência dos rios São Francisco (à direita) e Paracatu (à esquerda).

Ao longo das planícies de inundação dos rios São Francisco e Paracatu, associadas às regiões de várzea, ocorrem inúmeras lagoas formadas em conseqüência das cheias anuais que ocorrem no local.

1.3.2.2 - SOLOS

As informações sobre os tipos de solos existentes na região do Remanso do Fogo foram obtidas a partir dos trabalhos de levantamento sistemático realizados pela EMBRAPA (1979) e pelo CETEC (1980) na porção Norte do Estado de Minas Gerais.

Em termos pedológicos, a área de estudo caracteriza-se por apresentar basicamente solos pouco desenvolvidos (areias quartzosas, solos aluviais e, localmente, solos hidromórficos), solos com horizonte B latossólico (latossolo vermelho amarelo) e solos com horizonte B incipiente (solos litólicos).

As areias quartzosas são constituídas por solos arenosos profundos e essencialmente quartzosos de granulação média a fina, apresentando colorações que variam de vermelha a alaranjada e teores de argila abaixo de 15%. São excessivamente drenadas, desprovidas de minerais primários, e extremamente pobres em nutrientes. Constituem grandes áreas na bacia do São Francisco, ocupando a porção centro-sul e noroeste da área de estudo, configurando as superfícies de relevo tabulares e de aplainamento. Além da pobreza em macro e micro nutrientes, possui muito baixa capacidade de retenção de água, em função da sua textura arenosa.

Os solos aluviais são pouco desenvolvidos e ocorrem ao longo dos terraços fluviais recentes dos rios São Francisco e Paracatu. Apresentam horizonte A diferenciado, seguido de camadas estratificadas de composição granulométrica e distribuição de carbono (material orgânico) não uniforme. A natureza do material depositado pelos cursos de água é que irá determinar as variações dos teores de seus principais constituintes. São observados solos com baixos e altos valores de cálcio, magnésio, potássio, fósforo, soma de bases permutáveis, capacidade de troca catiônica, saturação em bases e ph. São solos de grande potencialidade

para a agricultura, necessitando apenas de drenagem, para evitar o excesso de água e o aumento dos teores de sais.

Os solos hidromórficos ocorrem nas partes planas e abaciadas da área de estudo, onde o lençol freático está situado próximo à superficie do terreno. Este tipo de solo reúne todos os solos cuja evolução é essencialmente caracterizada pelo efeito da saturação em água, permanente ou temporária. Esse efeito se reflete no perfil do solo, através de acumulação de matéria orgânica no horizonte superficial, e/ou presença de cores cinzentadas (que indicam redução) e cores mosqueadas, devido à segregação de ferro e de concreções de ferro e/ou manganês.

Os latossolos vermelho amarelo ocupam áreas a leste da margem oriental do rio São Francisco e caracterizam-se por serem solos muito antigos ou que se desenvolveram em material fortemente intemperizado, resultando como consegüência em perfis profundos e bem drenados, predominando, na massa do solo, sesquióxidos e caulinita. Os óxidos de ferro livre contribuem para a agregação das partículas de silte e argila, fazendo com que estes solos sejam bem arejados e friáveis, com ótimas propriedades físicas e predominância de cores vermelhas e amareladas. Em contrapartida, a baixa atividade das argilas silicatadas e dos óxidos de ferro fazem com que sejam deficientes em nutrientes. Compreendem perfis com horizontes A, B e C, com profundidade superior a 3 metros, sendo muito pequena a diferenciação entre seus horizontes. Apresentam baixos teores de silte e virtual ausência de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo. De um modo geral, os latossolos são muito porosos, bastante permeáveis, muito friáveis e muito resistentes à erosão. Quimicamente, são solos desprovidos de reservas de nutrientes para as plantas, com baixos teores de bases permutáveis, aliadas a baixos índices de saturação em bases. Constituem, na maioria das vezes, solos ácidos com baixos teores de cálcio, magnésio, potássio e fósforo, além de alta saturação em alumínio.

Nas porções Sul e Sudeste da área, ocorrem os solos litólicos que compreendem solos pouco desenvolvidos, rasos, possuindo apenas um horizonte A assentado diretamente sobre a rocha (sedimentos argilo-siltosos e carbonáticos do Grupo Bambuí). Este tipo de solo pode apresentar desenvolvimento de horizonte B, porém com espessura menor do que 15

8

centímetros. Apresenta forte limitação à atividade agrícola, no que se refere à fertilidade natural e à falta de água. São solos muito rasos e geralmente ocorrem em áreas de relevo mais acentuado, com presença quase constante de fragmentos de rochas.

Análises físicas de amostras de solos coletadas sobre as áreas de areias quartzosas (áreas de plantio de eucaliptos) mostram um solo composto por 58% a 59% de areia fina, 27% de areia média e quantidades iguais de areia grossa e silte (2%). A quantidade de argilas nessas areias é bastante reduzida (9-10%), sofrendo pequeno acréscimo nos horizontes inferiores (Figura 1.2). Resultados de análise semi-quantitativa por difratometria de Raios-X da fração argilosa destas amostras indicam que a caulinita é o argilo-mineral predominante, sendo também detectados traços de clorita.



Figura 1.2 - Composição física média da cobertura arenosa da área de estudo.

1.3.2.3 - CLIMA

Os dados climáticos da área do Remanso do Fogo foram extraídos do trabalho "Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais", publicado pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC (1983). Estas informações foram elaboradas basicamente a partir de dados meteorológicos cedidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), através das suas estações espalhadas pelo estado de Minas Gerais.

Embora distante mais de 120 km da estação meteorológica mais próxima (município de Pirapora, ao sul), os mapas dos parâmetros climáticos do estado de Minas Gerais gerados pelo CETEC fornecem uma boa caracterização climática para a área de estudo.

Segundo estes dados, o clima predominante é o semi-árido, caracterizado por duas estações distintas: uma estação seca mais longa, cujo trimestre mais seco corresponde aos meses de junho, julho e agosto, seguida de curta estação chuvosa nos meses de novembro, dezembro e janeiro.

A precipitação total anual nesta região encontra-se aproximadamente entre 900 e 1100 mm, com coeficientes de variação anual da precipitação entre 30% e 35% (Figura 1.3)

A temperatura média do ar para o mês mais frio (julho) é de 22° C, e, para o mês mais quente (janeiro), de 24° C (Figura 1.4). A amplitude térmica das médias mensais quase sempre se mantém abaixo de 5° C.

Com relação à nebulosidade e, conseqüentemente, com a ocorrência de cobertura de nuvens, os menores índices são observados nos meses de junho, julho e agosto (índices menores que 20%), coincidindo com o período mais seco da região.

Com base em informações climatológicas, Minas Gerais, durante todo o ano, está sob o domínio da circulação do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, configurando movimentos verticais tipicamente descendentes. O núcleo desse anticlone varia na direção NO-SE durante o decorrer do ano, fazendo com que o estado se caracterize por ventos

10

predominantemente do quadrante nordeste durante o verão, e dos quadrantes sudeste e nordeste no inverno. A velocidade do vento varia muito pouco no decorrer do ano, atingindo médias mensais entre 0,5 e 4 m/s. Na área de estudo, as velocidades médias anuais dos ventos oscilam entre 1,2 m/s e 1,5 m/s.

Levando-se em consideração a radiação solar incidente, os mapas da Figura 1.5 mostram que a região do Remanso do Fogo encontra-se submetida a índices médios que variam entre 500 cal cm⁻² dia⁻¹, para o mês mais quente do ano (janeiro), e entre 350 a 400 cal cm⁻² dia⁻¹, para o mês mais frio (julho), mostrando uma relação bastante significativa entre o tipo de clima e as condições de coberturas de nuvens.

1.3.2.4 - VEGETAÇÃO

Dentre as inúmeras classificações brasileiras propostas para a vegetação (Veloso *et. al.*, 1991), as que melhor se adaptam à área de estudo são as classificações propostas por Andrade Lima (1966), Veloso (1966) e a do Projeto RADAM (Veloso & Góes-Filho,1982), que enquadram a região do Remanso do Fogo num contexto geral de cerrado com cobertura vegetal do tipo savana.

A savana, ou simplesmente cerrado, ocorre na região de estudo associada às áreas de relevo plano, portadora de solos tipicamente arenosos, apresentando-se como uma formação vegetal composta de três estratos diferenciados: um arbóreo (superior), um arbustivo (intermediário) e um subarbustivo e herbáceo (inferior). Em densidades variáveis, ocorrem no cerrado árvores de pequeno porte, com alturas que variam de 3 a 6 metros, apresentam troncos e galhos retorcidos, folhas espessas e coriáceas, de tamanho relativamente grande e raramente decíduas. A casca dos troncos é por vezes constituída de cortiça de pequeno desenvolvimento, sendo geralmente desprovida de acúleos ou espinhos, ocorrendo raríssimas exceções. A constituição florística do cerrado é bastante diversificada, podem ser citadas as espécies arbóreas como a Aroeira (*Astronium fraxinifolium*), Araticum (*Annona crassiflora*), Ipê branco (*Tabebuta roseo-alba*) e amarelo (*Tabebuta sp.*), Pequi (*Caryocar brasiliense*), Marmelo (*Plenckia polpunea*), Angico (*Anadenanthera falcata*), Sucupira (*Ferreira spectabilis*), Jatobá (*Hymenaea stigonocarpa*), Jacarandá (*Machaerium sp.*), Cedro (*Cedrela*)



Figura 1.3 - Área de estudo inserida nos mapas de precipitação total anual e do coeficiente de variação da precipitação anual, dentro do contexto do estado de Minas Gerais (CETEC, 1983).



Figura 1.4 - Área de estudo inserida nos mapas de temperatura média do ar para om mês mais quente - janeiro e para o mês mais frio - julho, dentro do contexto do estado de Minas Gerais (CETEC, 1983).



Figura 1.5 - Área de estudo inserida nos mapas de radiação solar incidente para o mês mais quente do ano - janeiro - e para o mês mais frio - julho, dentro do contexto do estado de Minas Gerais (CETEC, 1983).
fissilis), Cagaita (*Eugenia dysenterica*), Murici (*Byrsonima sp.*), entre outras, associadas a arbustos e tufos de gramíneas.

Complementando as informações acima com base no mapa de cobertura vegetal e uso do solo do estado de Minas Gerais (IEF, 1994), elaborado a partir de imagens do satélite LANDSAT 5 TM obtidas entre 1990 e 1993, a área de estudo apresenta ainda outras associações vegetais.

Nas depressões dos rios São Francisco e Paracatu, e ao longo dos seus afluentes onde ocorrem condições de umidade permanente, encontramos as florestas de galeria ou matas ciliares, também denominadas de floresta estacional semidecidual ou floresta tropical subcaducifólia. Sujeita a mudanças devido a variações estacionais, difere das formações ombrófilas pela porcentagem de árvores caducifólias no conjunto florestal, situada entre 20 e 50% de espécies que perdem suas folhas na época desfavorável (estação seca). Mostrando estruturas e composições variadas, este tipo de floresta relaciona-se com as florestas úmidas quanto à sua flora, destacando-se uma composição parecida com a da Mata Atlântica, onde são encontradas espécies como a Copaíba (*Copaifera langsdorffii*), Canela (*Ocotea sp.* e <u>Nectandra sp.</u>), Guapuruvu (<u>Shizolobium parahyba</u>), Cedro (*Cedrela fissilis*), Vinhático (*Plathymenia foliolosa*), Peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*), Jequitibá-rosa (*Cariniana estrellensis*), entre outras.

Nas áreas de ocorrências dos calci-pelitos e calcáreos do Grupo Bambuí (porção Sul da área de estudo), predomina uma vegetação de floresta estacional decídua, relacionada ao clima de duas estações bem distintas, englobando agrupamentos remanescentes de florestas tropicais caducifólias, também designadas de "matas secas". Nestes locais, da mesma forma que nas savanas, ocorrem indivíduos adaptados à deficiência hídrica, possuindo uma estatura maior que os do cerrado. Nessas áreas a porcentagem de árvores caducifólias (árvores que apresentam queda de folhas no período desfavorável - seco) no conjunto da floresta é igual ou maior que 50%. São espécies características desta comunidade a Barriguda (*Cavanillesia arbórea*), o Angico (*Anadenanthera macrocarpa*), o ipê (*Cabralea canjerana, Aspidosperma sp., <u>Tabebuia sp.</u>) o Cedro (<i>Cedrela fissilis*), a Aroeira (*Astronium urundeuva*), o Ipê-cascudo (*Cybistax antisyphilitica*), entre outras, ocorrendo também vegetação arbustiva e gramíneas.

Devido à intervenção humana, que atua derrubando ou queimando as comunidades vegetais nativas para implantação de atividades agro-pecuárias ou extrativistas (carvão), é bastante comum a ocorrência de áreas com a formação de vegetação secundária, também denominadas de capoeiras. Estas constituem um tipo de mata incipiente, com troncos finos e representam o início do processo de reconstituição parcial da formação primitiva.

Sobre as regiões de relevo plano existentes na porção Sul da confluência dos rios São Francisco e Paracatu, nas imediações de Cachoeira do Manteiga, ocorrem extensas áreas de plantio de eucaliptos, que após o corte são transformados em carvão vegetal e utilizados nas indústrias siderúrgicas locais. Nestas áreas de reflorestamento são plantados basicamente *Eucalyptus camaudulenses*, ocorrendo plantios localizados de *Eucalyptus urophylla*.

Diferente das comunidades vegetais naturais circunvizinhas, altamente adaptadas ao tipo de substrato e as condições climáticas, a floresta de eucaliptos constitui uma comunidade vegetal exótica, artificialmente introduzida e, portanto, mais suscetível aos efeitos causados pelo estresse hídrico e nutricional imposto pelas condições locais. Neste sentido, os efeitos indiretos decorrentes da presença de HCs gasosos também deverão ser potencialmente mais fáceis de se detectar nesta comunidade vegetal, quando comparados com as espécies naturais existentes. Desta forma, foi sobre estas áreas de plantio de eucaliptos que se concentraram os estudos deste trabalho.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO, EXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS GASOSOS E O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO DA DETECÇÃO DE HIDROCARBONETOS EM SUPERFÍCIE

UMA REVISÃO

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO, EXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS GASOSOS E O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA DETECÇÃO DE HIDROCARBONETOS EM SUPERFÍCIE

- UMA REVISÃO -

2.1 - EXPLORAÇÃO DE HIDROCARBONETOS NA BACIA DO SÃO FRANCISCO

Seguindo os princípios de avaliação das possibilidades petrolíferas das bacias brasileiras, a PETROBRAS iniciou em 1961 um programa de investigação geológica de toda bacia do São Francisco, tendo concluído, naquela época, que a possibilidade da existência de HCs era praticamente nula (Oliveira, 1962; Moore, 1964).

Durante alguns anos as pesquisas foram interrompidas e só foram retomadas em 1970, quando se constatou a presença de gás em um poço perfurado para água no município de Montalvânia (Norte de Minas Gerais). Técnicos do Centro de Pesquisas da PETROBRAS. com base em análises químicas realizadas, concluíram tratar-se de gases termoquímicos provenientes de uma camada de folhelho betuminoso preto, de restrita extensão lateral (Prade, 1970). Neste mesmo período, segundo informações verbais do Prof. Gilberto Amaral, a SHELL Mineração constatou a presença de gases em uma perfuração prospectiva para chumbo e zinco. No entanto, não foi encontrado nenhum tipo de dados bibliográficos sobre esta ocorrência, assim como a localização deste poço.

Novo período sem atividades ocorreu até 1976, quando foram programadas novas investigações geológicas, com objetivos voltados para a obtenção de dados sobre a estratigrafia e tectônica da bacia. Os principais resultados dessas etapas são apresentados nos trabalhos de Tomasi (1977) e Piazza *et al.* (1977). Estes autores concluíram ainda que, se

parte dos sedimentos que preenchem a bacia do São Francisco (pertencentes ao Grupo Bambuí) estivesse preservada da ação metamórfica e tectônica, as possibilidades de se encontrar acumulações comerciais eram praticamente nulas e que, se ainda assim houvesse acumulações, estas seriam de regulares a ruins, restringindo suas perspectivas à ocorrência de gás.

Nesta mesma época (1976), em trabalho independente, o Departamento de Obras Contra a Seca (DNOCS), constatou a produção sub-comercial de gás em um poço perfurado para água no município de Buritizeiro (poço do Jacarezinho), tendo a PETROBRAS tomado conhecimento deste fato apenas em 1986, através do professor da Escola de Minas de Ouro Preto, Haroldo Zeferino da Silva (Melo *et al.*, 1987).

Estimulada por estas notícias e pela mudança de enfoque sobre as possibilidades petrolíferas dos estratos Pré-cambrianos, veiculadas pela literatura mundial no final dos anos 70 e início dos anos 80, a PETROBRAS, através de trabalhos escritos por Mello & Piazza (1984), Zalán (1985), Piazza *et al.* (1987), Ojeda (1985), Kiang (1987), retomou os estudos da bacia do São Francisco. Esta retomada resultou em várias campanhas de campo e inúmeras descobertas de exsudações superficiais de gás, com destaque para a emanação natural de gás do rio Paracatu, localizada nas proximidades de Cachoeira do Manteiga - MG, em local denominado de Remanso do Fogo.

Estas descobertas culminaram na perfuração de três (3) poços profundos no período de 1988 a 1989. Desses três poços perfurados pela PETROBRAS, 1-MA-1-MG (Montalvânia, MG), 1-RF-1-MG (Remanso do Fogo, MG) e 1-RC-1-GO (Rio Corrente, GO), os dois primeiros revelaram-se produtores sub-comerciais de gás, enquanto o último foi considerado seco.

Ainda em 1989, seguiram-se os trabalhos de superfície, registrando a descoberta de novas exsudações de gás, destacando-se desta vez as dos rios Indaiá e Borrachudo, nas proximidades da represa de Três Marias.

16

A partir de 1990, com base nos resultados negativos dos poços perfurados, reiniciou-se uma nova fase de avaliação da bacia do São Francisco com a elaboração de levantamentos de métodos potenciais (gravimétrico e magneto-telúrico), reprocessamento de dados aeromagnetométricos, levantamentos sísmicos e novas campanhas de campo. Esses novos esforços tiveram o intuito de aprimorar os conhecimentos da bacia e direcionar os futuros trabalhos de exploração de petróleo.

Os últimos estudos realizados sobre os dados obtidos desses levantamentos são relatados nos trabalhos de Braun *et al.* (1993), Martins *et al.* (1993), Marinho *et al.* (1993) e Teixeira *et al.* (1993). Estes trabalhos indicaram ser a porção Sudoeste da bacia como a mais interessante para a realização de novos trabalhos de pesquisa, sendo hoje em dia a região onde a PETROBRAS despende seus esforços exploratórios através de levantamentos sísmicos e trabalhos de detalhamento geológico.

Como resultado de trabalhos de fotointerpretação, geologia de campo e interpretação das linhas sísmicas levantadas nestas áreas nos últimos 7 anos, Braun *et al.*(1996) mostram um perfil sísmico que se estende desde a Serra da Água Fria (MG), passando pela sondagem do Remanso do Fogo, até Cristalina (GO), mostrando o estilo estrutural da bacia e a continuidade das seqüências psamíticas pré Grupo Bambuí (seqüências Macaúbas, Jequitaí e Paranoá) embasadas por carbonatos que atingem espessuras superiores a 1000 metros na porção Sudoeste da bacia, reforçando os argumentos de ser esta área a mais interessante para a prospecção de HCs na bacia do São Francisco.

2.2 - GEOLOGIA REGIONAL

Levando-se em consideração a área relativamente reduzida de abrangência deste estudo, dar-se-á ênfase aos aspectos tectono-estruturais da porção sul do Cráton do São Francisco, assim como aos aspectos geológicos relacionados aos sedimentos do Grupo Bambuí, que constituem o substrato rochoso da região do Remanso Fogo.

O termo Supergrupo São Francisco, algumas vezes mencionado nos itens posteriores, segue a definição de Pflug & Renger (1973), que atribuem a esse Supergrupo todas as

unidades correlacionáveis aos grupos Bambuí e Macaúbas, depositadas sobre o Cráton do São Francisco e sobre suas respectivas extensões nas faixas de dobramentos adjacentes.

2.2.1 - ASPECTOS TECTONO-ESTRUTURAIS DA PORÇÃO SUL DO CRATÓN DO SÃO FRANCISCO

Definido por Almeida (1977), o Cráton do São Francisco está localizado na porção Centro-Leste do território brasileiro e constitui a segunda mais extensa das áreas da Plataforma Sul-Americana não afetada pela Orogênese Brasiliana (o Cráton Amazônico constitui a mais extensa área). Consolidado no Proterozóico Inferior, o cráton tem seus limites definidos por faixas de dobramentos, cujas configurações foram impostas pela Orogênese Brasiliana. Limita-se a norte e nordeste pela Faixa Riacho do Pontal e pela Faixa Sergipana (Brito Neves, 1975 *apud* Mascarenhas *et al.*, 1984), a noroeste pela Faixa Rio Preto (Inda & Barbosa, 1978 *apud* Mascarenhas *et al.*, 1984), a sul pela Faixa Mantiqueira (Silva, 1987), e a leste e oeste pelas faixas Araçuaí e Brasília (Almeida, 1968), respectivamente.

Nos últimos anos, uma série de estudos estruturais e tectônicos foram realizados nas seqüências Proterozóicas de cobertura do Cráton do São Francisco. Entre estes podem ser citados os de Silva *et al.* (1989), Chang *et al.* (1988), Magalhães (1988), Magalhães (1989). Oliveira (1989), Barcellar (1989), Danderfer (1990), Lagoeiro (1990), Ortu (1990), Alkmim *et al.* (1989), Alkmim & Chemale (1989) e Uhlein (1991).

Todos estes trabalhos foram precedidos pelos trabalhos pioneiros de Dardene (1978) e Campos Neto (1984), enfocando o setor oeste do cráton, junto à Faixa Brasilia, e pelos trabalhos de Inda & Barbosa (1978), Jardim de Sá (1976 e 1981), Moutinho da Costa & Inda (1982), estes últimos abordando aspectos do Espinhaço Setentrional e Chapada Diamantina na porção leste do cráton (Faixa Araçuaí).

Chemale *et al.* (1992) esboçaram a primeira síntese dos conhecimentos sobre a deformação das coberturas Proterozóicas e Alkmim *et al.* (1993) apresentaram uma revisão sobre o arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco.

Mais recentemente, diversos trabalhos foram publicados nos anais do II Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco, realizado em agosto de 1993, onde os aspectos estruturais da cobertura foram exaustivamente abordados.

A área de estudo (Remanso do Fogo) encontra-se inserida no contexto do Domínio Estrutural I de Chemale *et al.* (1992), perfazendo parte da porção meridional do Cráton do São Francisco, cujos limites compreendem as porções externas de dois cinturões de dobramentos e empurrões de vergências opostas: a Faixa Brasília à oeste e a Faixa Araçuaí à leste (Figura 2.1).

2.2.1.1 - O ARCABOUÇO ESTRUTURAL DO DOMÍNIO I

Este domínio, limitado à nordeste pelo Corredor do Paramirim, divide-se em quatro compartimentos: o Compartimento W; o Compartimento NW; o Compartimento E e o Compartimento Central. Este último é ainda subdividido nas áreas C1 e C2, nas quais os sedimentos do Supergrupo São Francisco encontram-se indeformados (Figura 2.1).

Serão aqui abordados apenas os aspectos tectono-estruturais dos domínios W, E e Central, uma vez que o Domínio NW encontra-se fora do contexto da área de estudo.

2.2.1.2 - O COMPARTIMENTO W - Porção externa da Faixa Brasília

A organização interna e a história tectônica do Compartimento W já foi objeto de estudos até a altura do paralelo 15[°]. Deste paralelo para o Norte, na sua transição para a zona de influência da Faixa Rio Preto, além de não existirem estudos de detalhe, a maior parte da área é recoberta por sedimentos Cretácicos (Formação Urucuia).

No setor sul do Compartimento W, registram-se estruturas relativas a dois eventos de deformação distintos. O primeiro tem caráter extensional e se expressa por uma estruturação em altos e baixos do substrato pré-Supergrupo São Francisco. Tais feições são evidentes na interpretação gravimétrica proposta por Lesquer *et al.* (1981) para a metade sul do



Figura 2.1 - Domínios estruturais do Cráton São Francisco e sua compartimentação meridional. 1 - Sentido dos esforços tectônicos fora do limite do cráton. 2 - Sentido dos esforços tectônicos dentro das zonas de cobertura proterozóica deformada no interior do cráton. 3 - Zonas de cobertura proterozóica indeformada. 4 - Embasamento. 5 Área de estudo. 6 - Cidades: BJ - Bom Jesus da Lapa; PMA - Palmas de Monte Alto; PM Patos de Minas; P Pirapora; TM - Três Marias; SL - Sete Lagoas; BH - Belo Horizonte. 7 - Compartimentos estruturais da porção sul do cráton (DOMÍNIO I). 8 - Limites do cráton. (desenho adaptado e modificado de Alkmim *et al.* 1993).

Compartimento W. Conclui-se dos trabalhos de Magalhães (1989), Barcellar (1989) e Pinho *et al.* (1989) que a tectônica extensional esteve ativa até a deposição dos sedimentos terrígenos que marcam a base do Supergrupo São Francisco na região.

O segundo evento de deformação foi de natureza compressional e afetou todo o pacote sedimentar Bambuí. As formas principais de acomodação da deformação são sistemas de falhas transcorrentes sinistrais de direção NW-SE e destrais NE-SW, falhas de empurrão, deslocamentos interestratais e dobras flexurais. Apesar de complexidades locais, induzidas pelos sistemas transcorrentes, todo o conjunto se orienta preferencialmente segundo N-S e é vergente para o interior cratônico. As magnitudes de deformação mergulham no mesmo sentido.

Ao sul do paralelo 18°, o quadro estrutural desse compartimento é dominado por um sistema de falhas transcorrentes sinistrais de direção NW-SE (Mattos 1986, Magalhães 1989), cuja maior atividade ocorreu no final do evento compressional. Tal fato pode ser comprovado pela existência de uma segunda família de dobras e falhas geneticamente relacionadas ao sistema direcional e pela rotação geral anti-horária experimentada por todos os elementos tectônicos N-S pré-existentes na área de influência das transcorrências. Há também evidências de que tais estruturas têm longa história de atividade, tendo sido herdadas do embasamento e reativadas até mesmo durante o Mesozóico. Ao longo dessas estruturas, a distribuição preferencial de rochas intrusivas alcalinas de idade Cretácea é evidente.

Uma análise do conjunto de estruturas dos metassedimentos do Grupo Canastra, -os quais se encontram justapostos ou empurrados sobre os sedimentos Bambuí, no setor sul do Compartimento W e ao longo do limite cratônico - , indicou a existência de uma história de deformação mais complexa para aquelas rochas. É marcante para as rochas do Grupo Canastra uma foliação milonítica associada a uma lineação mineral e de estiramento, orientada preferencialmente segundo E-W e mais antiga do que o Grupo Bambuí (Magalhães 1989.

Desta forma, a história tectônica da Faixa Brasília nesse setor ficaria marcada por dois eventos compressionais de mesma polaridade, separados por um episódio de extensão. O

evento mais antigo afetou somente os metassedimentos do Grupo Canastra e poderia se relacionar tanto ao Evento Uruaçuano, como é tradicionalmente proposto para a evolução tectônica da Faixa Brasília (Simões & Valeriano, 1990), como a uma manifestação precoce do Evento Brasiliano. O real significado das estruturas extensionais no contexto evolutivo da margem W do cráton, bem como o seu mecanismo geral de nucleação, ainda estão por ser investigados.

O segundo evento compressional, estruturador, do Compartimento W inverte parcial ou totalmente as estruturas extensionais mais antigas. Bonhonme (1976) sugere que sua atuação tenha se dado entre 600 e 650 M.a.

Em virtude das irregularidades do substrato e da tectônica transcorrente, que induzem o envolvimento do embasamento na deformação, e devido em parte à existência de um grande número de corpos intrusivos cretácicos na sua porção sul, a arquitetura geral do Compartimento W pode ser considerada a mais complexa do interior cratônico.

2.2.1.3 - O COMPARTIMENTO E - Porção externa da Faixa Araçuaí

Ao longo de todo o setor leste do Domínio I, a cobertura cratônica experimentou uma deformação epidérmica, compressional, frontal e dirigida para o interior do cráton. Falhas de empurrão, zonas de cisalhamento dúcteis, dobras assimétricas e vergentes para W, em todas as escalas, em geral articuladas ou limitadas por um grande descolamento basal ou por descolamentos interestratais, dominam a arquitetura do compartimento E (Chang *et al.* 1988, Magalhães 1988, Alkmim *et al.* 1989, Barcellar 1989, Oliveira 1989, Uhlein 1991). Outros elementos importantes do acervo são falhas transcorrentes sinistrais e destrais e fraturas em pares conjugados de direção NW-SE e NE-SW, respectivamente, falhas de transferência E-W e uma conspícua clivagem ardosiana ou espaçada de orientação N-S e com mergulho para E, a qual se associa uma lineação de estiramento E-W.

A intensidade da deformação nos sedimentos do Supergrupo São Francisco cresce progressivamente na direção leste, acompanhada por uma variação também crescente das condições metamórficas. Estas passam de anquimetamorfismo nas porções centrais do cráton à paragênese em fácies xisto-verde junto à Serra do Espinhaço Meridional.

O limite Cráton São Francisco - Faixa Araçuaí é marcado, na sua maior extensão, pela primeira ocorrência de rochas do Supergrupo Espinhaço, empurradas sobre os sedimentos Macaúbas ou Bambuí. A análise estrutural realizada por diversos autores (Uhlein *et al.* 1986, Magalhães 1988, Alkmim *et al.* 1989, Oliveira, 1989) nas rochas do Supergrupo Espinhaço revelou a mesma história deformativa, os mesmos estilos e cinemática da seqüência São Francisco aflorante no Compartimento E. Um evento compressional mais antigo, como aquele observado nas rochas do Grupo Canastra, não é encontrado neste compartimento.

2.2.1.4 - O COMPARTIMENTO CENTRAL

As zonas deformadas externas às faixas Brasília e Araçuaí possuem uma zona de convergência que cobre uma região situada ao norte da cidade de Três Marias (MG). Deste modo, uma secção realizada nessa latitude mostrará os sedimentos do Grupo Bambuí deformados em quase toda a sua extensão. A delimitação dessa zona ainda é provisória. Até o momento, também não foram encontradas no campo intersecções de estruturas de vergências opostas, que poderiam ser relacionadas ao desenvolvimento de uma e outra faixa marginal. Nesta área, dominam os dobramentos simétricos de grandes amplitudes (Alkmim *et al.* 1989, Barcellar 1989). A sul e a norte dessa interferência ocorrem vastas áreas onde as rochas do Supergrupo São Francisco se apresentam indeformadas, configurando os setores C1 e C2, respectivamente (Figura 2.1).

Os setores C1 e C2 parecem coincidir com antigos altos do embasamento que controlam a deposição e a deformação posterior dos sedimentos do Supergrupo São Francisco. Considerando somente a seção carbonática da base do Grupo Bambuí, pode-se verificar uma grande diferenciação faciológica a leste e oeste deles. Depósitos de águas progressivamente mais rasas e mesmo um acunhamento geral da unidade são verificados em direção ao Compartimento C1, ao longo de um perfil hipotético E-W, passando um pouco ao norte do paralelo 20 (Magalhães 1988, Magalhães 1989).

2.2.2 - CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS SOBRE OS ASPECTOS TECTONO-ESTRUTURAIS

Barcellar (1989) e Barcellar & Alkmim (1993), em estudos realizados na porção Oeste da zona de confluência dos faixas Brasília e Araçuaí (região próxima à cidade de Três Marias), subdividem o Compartimento W em quatro domínios estruturais distintos em função da sua natureza, cronologia relativa e posição espacial dos elementos tectônicos. Estes domínios possuem como característica mais marcante o decréscimo não linear da intensidade de deformação para leste. Neste local ocorre a transição do Compartimento W para o Compartimento C (central), onde se encontram importantes zonas de falhas reversas, associadas a intenso dobramento (zonas de falha de João Pinheiro e São Domingos).

Os *seeps* de gás encontrados na região de Três Marias são relacionados a essas feições estruturais. Dobras apertadas e vergentes na porção oeste desta região passam a dobras abertas e desarmônicas a leste, sem vergência clara.

A área do Remanso do Fogo está inserida no Compartimento C1, onde a deformação é de muito baixa intensidade, sendo possível a caracterização de algumas zonas de cisalhamento inter e intra-estratais e suaves ondulações.

Lineamentos de relevo e drenagem visualizados em imagens de satélite mostram *trends* de direções N50-70E e N25-30E, posicionando-se sobre as localidades de ocorrência dos *seeps* de gás da região do Remanso do Fogo. Os lineamentos N25-30E correspondem a zonas de falhas e de fraturas que mostram relação de paralelismo com as direções das falhas de empurrão localizadas no Domínio E (Espinhaço), nestas mesmas latitudes.

Chang *et al.* (1988), em trabalho de interpretação visual realizado sobre imagens LANDSAT TM na escala de escala 1:500.000, mostram os principais sistemas de lineamentos de toda a região Centro-Sudeste da bacia do São Francisco (Figura 2.2). Alguns dos lineamentos refletem grandes falhamentos, como os *fronts* de empurrão que colocam os quartzitos do Supergrupo Espinhaço em contato com os sedimentos do Supergrupo São Francisco. Nesta região ocorrem falhas subverticais em pares conjugados, que apresentam

Mapa Foto-Estrutural



Figura 2.2 - Mapa foto-estrutural elaborado a partir de produtos fotográficos LANDSAT-TM. (Desenho adantado e modificado de Chang et al 1988)

deslocamento sinistral aproximadamente paralelo à direção N50-60W e de deslocamento destral segundo N50-55E, além de falhas de transferência que se desenvolvem pela movimentação diferencial nas frentes de empurrões, apresentando direções segundo E-W.

2.2.3 - O GRUPO BAMBUÍ

Limitado a oeste pela Faixa Brasília e a leste pela Faixa Araçuaí, o Grupo Bambuí representa uma ampla cobertura cratônica, distribuída pelos estados de Minas Gerais, Goiás. Tocantins e Bahia. Esta unidade é composta por uma seqüência de sedimentos pelitocarbonáticos capeada por um pacote essencialmente arenoso. Nas porções centrais do Cráton do São Francisco, o Grupo Bambuí apresenta-se pouco deformado e/ou metamorfizado, enquanto nas bordas são nítidas as evidências de tectonismo.

2.2.3.1 - EVOLUÇÃO DOS CONCEITOS ESTRATIGRÁFICOS

A Figura 2.3 traz uma síntese sobre a evolução das colunas estratigráficas propostas para o Grupo Bambuí, expostas a seguir.

As primeiras referências às rochas carbonáticas aflorantes no vale do rio São Francisco foram feitas por algumas das expedições estrangeiras que percorreram o Brasil durante o século passado. Entre outras, destacam-se as viagens de Spix & Martius (1823-1831) na área do divisor Tocantins/São Francisco.

Eschewege (1832) definiu o "Arenito Pirapora" na região de Pirapora - MG e os "Terrenos de Transição" (calcários, arenitos e xistos), enquanto Gardner (1846) observou litologia semelhante na Serra Geral em Goiás. Porém, coube a Derby introduzir, em 1880, o termo Calcáreo do São Francisco para definir a seqüência pelito-carbonática das margens do rio São Francisco. Tal denominação foi modificada por Rimann (1917) para Série Bambuí e ficou posteriormente consagrada na literatura geológica.



Figura 2.3 - Quadro sintético mostrando a evolução das colunas estratigráficas propostas para o Grupo Bambuí (desenho modificado e adaptado de Simonetti, 1994).

A partir das definições iniciais e com base em estudos localizados, foram feitas algumas tentativas de subdividir a então Série Bambuí. Freyberg (1932), trabalhando em Minas Gerais, propôs a separação dos pacotes basais e dobrados da borda da bacia (Camadas Indaiá) daqueles superiores e muito pouco deformados que ocorriam no centro da bacia (Camadas Gerais).

Andrade Ramos (1956), em trabalho realizado nos arredores do Distrito Federal. reconheceu três unidades distintas, as quais denominou informalmente de Arcósios Torto. Quartzito Paranauá e Calcáreo Palmeira.

Costa e Branco (1961), com base em observações realizadas ao longo da rodovia Belo Horizonte - Brasília (BR - 040), elaboraram a primeira coluna estratigráfica da Série Bambuí, distinguindo as formações Carrancas (conglomerado basal), Sete Lagoas (calcários intermediários) e Paraopeba (seqüência superior), subdividida nos membros Serra de Santa Helena (ardósias), Lagoa do Jacaré (siltitos com leitos de calcários), Três Marias (siltitos) e Serra da Saudade (siltitos e calcários). Segundo Baptista *et al.* (1984), a Formação Paraopeba foi publicada com o nome de Formação Rio Piracicaba por erro de impressão. Esta divisão serviu de base para muitos trabalhos posteriores e foi de grande importância para o desenvolvimento dos conceitos lito-estratigráficos do Grupo Bambuí.

Oliveira (1962) observou que as unidades Carrancas, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré, apesar de facilmente identificáveis na parte Sul da Bacia Sedimentar do São Francisco, perdiam sua individualidade na direção norte, tornando-se indistingüíveis. A partir deste fato, sugeriu-se uma subdivisão em duas unidades distintas: 1 -Grupo São Francisco (inferior), constituído por calcáreos, localmente oolíticos, com eventuais intercalações de ardósias e siltitos, subdividido nas formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré; 2 - Formação Três Marias (superior) formada por siltitos e arcóseos com ocasionais intercalações de ardósias.

Barbosa (1965) sugeriu algumas modificações na coluna de Costa e Branco (1961), incluindo na base as formações Samburá e Paranoá. Posteriormente, verificando que a variedade faciológica do Bambuí dificultava a utilização de uma coluna estratigráfica única, optou por uma subdivisão em fácies: Paranoá, inferior; Sete Lagoas e Indaiá, intermediárias; e Três Marias, superior (Barbosa, 1967). Nesta época, Almeida (1967) substitui o termo cronoestratigráfico "Série Bambuí" para o termo litoestratigráfico "Grupo Bambuí".

Com o objetivo de estabelecer uma relação genética entre a evolução da bacia sedimentar e suas várias expressões litológicas, Braun (1968) propôs uma divisão baseada nas seguintes formações: Paranoá (conglomerado basal sotoposto a quartzitos, filitos e metassiltitos); Paraopeba (calcários e pelitos); e Três Marias, superior (arcóseos localmente calcíferos).

Na tentativa de integrar as diversas expressões faciológicas às características tectônicas do Grupo Bambuí, Costa *et al.* (1970) aplicaram o conceito de "tectonogrupo", que associa um conjunto paragenético de fácies a uma determinada fase tectônica. Estes autores sugeriram a subdivisão em três tectonogrupos: 1 - Formosa, correspondente às zonas miogeossinclinal Brasília e subgeanticlinal, com uma fácie nerítica (ortoquartizitos) e outra mista (intercalações cíclicas de metassiltitos, ardósias, margas, calcarenitos, ortoquartzitos, filitos, turbiditos e lamitos); 2 - João Pinheiro, correspondente à zona peri-cratônica, com duas fácies (ardósias com raros leitos carbonáticos e carbonatos); e 3 - Sete Lagoas, das zonas do miogeossinclinal Brasília (rochas carbonáticas intercaladas a ardósias e metassiltitos). Todas as designações estratigráficas propostas até a época estariam englobadas nessa subdivisão, com exceção apenas da Formação Três Marias, considerada como um grupo independente (Grupo Pirapora).

Outras propostas estrátigráficas foram feitas no início da década de 70, baseadas em trabalhos localizados, servindo para confirmar a diversidade faciológica e a ampla distribuição dos sedimentos do Grupo Bambuí. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Cardoso (1973) realizado na região de Buenópolis (MG), onde foram introduzidas as formações Serra do Cabral (quartzitos correlacionáveis à Formação Paranoá) e Jequitaí (conglomerados) na base do grupo.

Misi (1976 e 1978) observou que as colunas estratigráficas estabelecidas para o Grupo Bambuí em Minas Gerais (Costa e Branco, 1961; Braun, 1968) estavam inteiramente representadas no Centro-Norte da Bahia, onde concentrou seus estudos. Definiu duas colunas litoestrátigráficas ali : 1 - no Oeste do estado, na Serra do Ramalho e adjacências, onde reconheceu seis unidades dispostas em camadas sub-horizontais, sobrepostas diretamente ao embasamento gnaíssico-migmatítico, formando amplos planaltos recobertos por sedimentos da Formação Urucuia (Cretáceo); 2 - Na região da Chapada do Irecê, Centro-Oeste do estado, esse autor distinguiu seis unidades assentadas em discordância erosiva sobre os quartzitos do grupo Chapada Diamantina, ocupando depressões em estruturas sinclinais.

Durante o "I Simpósio do Pré-cambriano do Cráton Sanfranciscano e da Parte Norte-Oriental do Brasil", realizado em 1973, foram discutidas as definições dos termos Bambuí e São Francisco. Nesta mesma época, Renger (1973) sugeriu que o termo Supergrupo São Francisco fosse aplicado a todas as unidades crono-correlatas ao Grupo Bambuí, ficando o termo Bambuí restrito ao domínio cratônico e representando os depósitos de plataforma correlacionáveis aos grupos Una, Rio Pardo e Miaba, na Bahia, e Vaza -Barris, em Sergipe.

Scholl (1976), trabalhando na porção Sudeste da Bacia Sedimentar do São Francisco, distinguiu dois horizontes carbonáticos separados por uma camada de clásticos finos e promoveu algumas alterações na coluna proposta por Costa e Branco (1961). Dividiu a Formação Sete Lagoas (basal) nas fácies Carrancas, Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, elevando os demais membros (Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias) à categoria de formações.

Amaral *et al.* (1976), baseados em interpretações realizadas sobre imagens do satélite LANDSAT 1 e em trabalhos de campo na área de abrangência da folha Belo Horizonte, propõem a divisão do Subgrupo Paraopeba nas formações Paranoá (basal), Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Três Marias. Dentro do contexto da área enfocada, as formações Paranoá e Três Marias mostram uma distribuição espacial claramente estabelecida, compondo aquela a porção basal do Grupo Bambuí na faixa de dobramentos Brasília, e a Formação Três Marias um capeamento discordante dos sedimentos do Subgrupo Paraopeba, na porção central da área estudada. Tal proposta foi feita levando-se em consideração a distribuição espacial das diferentes unidades litoestratigráficas do Grupo Bambuí e a sua situação tectonoestrutural.

Durante a elaboração do mapa geológico do estado da Bahia, Inda e Barbosa (1978) concluíram que o empilhamento litoestrátigráfico vertical era inadequado a um grupo com alta variedade faciológica e ampla distribuição. Desta forma, seguindo a proposta inicial de Costa et al. (1970), dividiram o equivalente ao Grupo Bambuí no território baiano (Grupo Una) em duas tectonozonas distintas: a primeira corresponderia à Bacia Sedimentar do São Francisco e representaria a sedimentação de um mar epicontinental (litofácies Ramalho e luiú); e a segunda, definida como região de dobramentos Rio Preto, caracterizaria uma zona de transição entre a plataforma e a faixa móvel marginal (parcialmente formada pela litofácies Barreiras). Dentro desse esquema, reconheceram três sequências litológicas fundamentais, supostamente superpostas e portanto com caráter estratigráfico: (1) Seqüência Clástica Inferior, ocorrendo nas litofácies Barreiras e Iuiú, seria dominantemente pelítica e psamítica. com calcários e margas no topo; (2) Sequência Carbonático-Pelítica, intermediária. subdividida em seis unidades com variações laterais entre si, constituída por calcários com ardósias, margas e metassiltitos subordinados, que teria a maior área de ocorrência e caracterizaria as litofácies Ramalho e Iuiú; e (3) Següência Clástica Superior, ocorrendo na litofácies Barreiras, seria essencialmente pelítica.

Dardene (1978) sintetiza os conhecimentos estratigráficos do Grupo Bambuí e retoma a definição original de Costa e Branco (1961), excluindo os sedimentos detríticos (Grupo Paranoá) sotopostos ao conglomerado basal do Bambuí, que denominou de Formação Jequitaí. Este autor alterou a posição estratigráfica da Formação Serra da Saudade, posicionando-a abaixo da Formação Três Marias. Fernandez *et al.* (1982), no relatório do Projeto Radambrasil, retiraram a Formação Jequitaí dos domínios do Bambuí e a incluíram no Macaúbas, enquanto as formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade foram reunidas no Subgrupo Paraopeba.

Silva (1987), trabalhando no Noroeste do estado da Bahia, reconheceu cinco unidades litoestruturais e elaborou uma coluna litoestratigráfica para o domínio cratônico (Unidade litoestrutural 1, Grupo Bambuí), definida pelas seguintes formações (da base para o topo): Canabravinha, São Desidério, Serra de Mamona e Riachão das Neves, respectivamente correlacionáveis com as formações Bebedouro (Bacia de Lençóis), Lagoa do Jacaré. Serra da Saudade e Três Marias. Mais recentemente, Dominguez (1993), em trabalho apresentado na reunião preparatória do II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, propôs uma nova coluna para o Supergrupo São Francisco no estado de Minas Gerais (Figura 2.4). Esta coluna, elaborada com base na coletânea de informações sobre a porção Sul do cráton do São Francisco e nos novos conceitos da estratigrafia de seqüência, é a adotada atualmente pelos exploracionistas da PETROBRAS nos trabalhos na bacia do São Francisco, embora os conceitos de estratigrafia de seqüência, originalmente desenvolvidos para siliciclastos, ainda não tenham sido muito difundidos para aplicação em carbonatos.

2.2.3.2 - AMBIENTE DEPOSICIONAL

Ainda que existam algumas controvérsias sobre a nomenclatura e distribuição das unidades do Grupo Bambuí, as opiniões sobre os ambientes deposicionais são mais uniformes.

A enorme distribuição das fácies do Grupo Bambuí é interpretada como produto da sedimentação em condições plataformais estáveis, em um mar epicontinental de baixa declividade, pouca profundidade, circulação restrita e alta salinidade (Shaw, 1964; Irwin, 1965). Tais condições conduziriam a gradientes relativamente uniformes de temperatura, energia e salinidade, permitindo uma deposição contínua e bem definida sobre extensas áreas plataformais.

Para o Grupo Bambuí, a interdigitação lateral e o caráter transicional de algumas fácies indicam que os ambientes migraram lateralmente, de acordo com os movimentos transgressivos e regressivos do mar daquela época (Misi, 1979). Em termos gerais, o grupo registra três megaciclos regressivos posteriores a um episódio glacial, representado pelos diamictitos da Formação Jequitaí. Em cada megaciclo, rápidas transgressões regionais são indicadas por fácies marinhas de sub a supra-litorâneas, que evoluem, ao final do último megaciclo, a continental e fluvial (Dardene, 1979). O primeiro megaciclo, representado pela Formação Sete Lagoas, teve início com a invasão marinha de áreas continentais baixas, onde se formaram sub-ambientes lacustres. A forte influência continental dessa fase de sedimentação é indicada, na base da sequência, por abundantes sedimentos terrígenos e pela



Figura 2.4 - Coluna estratigráfica do Supergrupo São Francisco no estado de Minas Gerais, elaborada com base na coletânea de informações sobre a porção sul do cráton do São Francisco e nos novos conceitos da estratigrafia de sequência (desenho extraído de Dominguez, 1993).

presença ocasional de gretas de contração e níveis dolomíticos, produtos de exposição subaérea à época de deposição. À medida que avançava a transgressão e a sedimentação passava a ser dominantemente química, depositavam-se os carbonatos da Formação Sete Lagoas. Uma subseqüente regressão conduziu a águas cada vez mais rasas, resultando um processo de ampla dolomitização (Fernandez *et al.*, 1982). Proliferava, então, intensa atividade biológica, hoje evidente pela abundância de matéria orgânica nos níveis pelíticos e pela ocorrência esparsa de estromatólitos.

Uma rápida transgressão marca o início do segundo megaciclo, a qual determinou a deposição dos siltitos da Formação Serra de Santa Helena em águas profundas, fora da influência de ondas e marés. Uma nova regressão marinha possibilitou a deposição da espessa seqüência carbonática da Formação Lagoa do Jacaré, onde ocorrem fácies de oosparitos e calcarenitos com estratificação cruzada do tipo *hummocky*, alternadas a fácies de calcários argilosos escuros e laminados, refletindo a sedimentação em águas ora rasas, ora mais profundas (Braun, 1988).

Fechando o ciclo deposicional desta seqüência, também precedido por uma breve transgressão, o último megaciclo é representado pelas formações Serra da Saudade e Três Marias, tendo ocorrido uma evolução da sedimentação de siltitos finamente laminados, depositados em águas profundas, para uma sedimentação de material mais grosseiro, de composição arcoseana, relacionado a uma regressão do nível do mar. Desde então, instalou-se um ambiente tipicamente deltáico, com fácies fluvio-continentais, evidenciada pelos siltitos e arcóseos da Formação Três Marias, onde são comuns as marcas de correntes e ondas, estratificações cruzadas e outras estruturas afins (Fernandez *et al.*, 1982).

2.2.3.3 - CRONOLOGIA DO GRUPO BAMBUÍ

Segundo Freiberg (1932), a primeira referência à possível idade dos terrenos atualmente relacionados ao Grupo Bambuí partiu de Liais, no ano de 1872, ao relacionar essas seqüências ao Cretáceo. Posteriormente, Derby (1880) atribuiu idade Siluriana, com base na presença de supostos restos de *Favosites* e *Chaetetes*, que Beurlen (1956) demonstrou, posteriormente, serem inorgânicos. Costa e Branco (1961) consideraram o Cambriano como o

limite máximo para a deposição do grupo, a partir de comparações com sedimentos Cambrianos da bacia Andina.

As primeiras datações radiométricas foram realizadas por Amaral & Kawashita (1967), utilizando folhelhos da região de Vazante (MG), sendo obtida uma idade de 600 ± 50 M.a. pelo método Rb/Sr. Esse valor foi posteriormente questionado por Dardene (1979), ao alegar que o metamorfismo poderia influenciar as datações. Em relatos feitos pelo prof. Gilberto Amaral, novas datações foram realizadas naqueles mesmos folhelhos pelo método K/Ar e obtiveram-se idades de até 900 M.a. Cabe ressaltar que estes folhelhos (Formação Vazantes) são correlacionados temporalmente aos folhelhos da Formação Sete Lagoas, segundo informações expressas no perfil sísmico apresentado por Braun *et al.* (1996).

Bonhomme (1976) obteve uma idade de aproximadamente 620 M.a. em datações Rb/Sr a partir de calcários negros da região de Januária, que corresponderia à fase principal do ciclo orogênico Brasiliano, atribuindo, portanto, essa idade como a mínima possível para o Grupo Bambuí.

Neves *et al.* (1979) situaram a deposição do Grupo Bambuí entre 1,2 e 1,0 G.a., tendo sofrido deformação e metamorfismo entre 650 e 500 M.a. (Ciclo Brasiliano).

A identificação provisória de vários estromatólitos colunares, tais como *Gymnosolen* ou *Boxonia*, atribuídos à Formação Sete Lagoas (Marchese, 1974; Campos Neto, 1979) e *Jurusania* (Formação Salitre, BA - Srivastava, 1982), sugere uma idade entre 1000 e 570 m.a. (Rifeano Superior a Vendiano).

A presença de possíveis microfósseis algáceos (algas unicelulares - Sommer, 1971) e algas calcáreas filamentosas (Cassedanne, 1982) constituíria - não fosse a preservação muito precária - evidências sugestivas de uma idade mais próxima ao final do Proterozóico superior.

Kawashita et al. (1987) estimaram idades de 680 e 570 M.a. para a deposição de rochas carbonáticas do grupo Bambuí, utilizando o método ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. Estas idades são

35

corroboradas em Kawashita *et al.* (1996), onde os autores fazem uma reavaliação das idades Rb/Sr do Grupo Una (correlato ao Grupo Bambuí, no estado da Bahia), com base na composição isotópica do Sr em carbonatos.

Considerando as limitações existentes nos métodos de datações empregados e a história geológica anterior e posterior à deposição do grupo Bambuí, pode-se dizer que estes sedimentos possuem idade relacionada ao Neoproterozóico superior, com valores aproximados entre 680 e 570 m.a. (Vendiano).

2.3 - EXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS GASOSOS

Segundo Hunt (1979), uma exsudação - ou *seep* - de HC pode ser definida como uma evidência visível, na superfície da Terra, da existência de óleo, gás ou betume oriundos de subsuperfície. Esta definição não inclui os *microseeps* ou *seeps* invísiveis . que são conhecidos como o produto de processos de migração primária (migração feita à distância). *Seeps* de grande porte são geralmente associados a processos de migração terciária, que é uma migração para a superfície a partir de acumulações localizadas em profundidades (Tissot & Welte, 1984).

As exsudações de HCs gasosos são constituídas por moléculas de baixo peso molecular, que se apresentam adsorvidas ou ocupando espaços intersticiais de solos ou de sedimentos em superfície, sendo diretamente relacionadas com acumulações de óleo e gás ou originadas por processos de migração à distância. As exsudações gasosas são compostas basicamente por metano (CH₄), etano (C₂H₆), propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀), encontrados na forma de n ou iso-butano. Em alguns casos, podem ocorrer moléculas de maior peso molecular, embora os HCs compostos por mais de 5 moléculas de carbono ocorram geralmente na forma de condensados ou líquida.

Hidrocarbonetos gasosos estão presentes em todos os reservatórios de petróleo e são suficientemente voláteis para chegar à superfície, bastando para isto que o meio apresente condições favoráveis para a sua migração.

Normalmente, gases termoquímicos (gases gerados pelo craqueamento térmico de matéria orgânica) não atingem a superfície verticalmente. Em geral, a migração ocorre ao longo de falhas e fraturas, com os gases podendo ser temporariamente trapeados (acumulados) pela presença de sedimentos de baixa permeabilidade.

Conforme relatado por Rezende *et al.* (1980), admite-se que acumulações significativas de gás e/ou óleo possam produzir emanações de HCs em direção à superfície por meio de falhas, fraturas, planos de acamamento ou por efusão (diferencial de pressão) e difusão (diferencial de concentração) e que estas possam ser efetivas e significativas ao longo do tempo.

O transporte de HC em solução aquosa configura um outro modo de migração (Jobson *et al.*, 1978; Tissot & Welte, 1984). A efetividade deste mecanismo irá depender da solubilidade do HC e do volume de água disponível para o transporte. Este mecanismo pode ser um fator de contribuição dominante ao longo de falhas hidrodinamicamente ativas. Devido ao decréscimo da solubilidade dos HCs, em função do aumento do número de átomos de carbono (Krauskopf, 1979), este mecanismo pode resultar numa gradação de altas concentrações de metano para concentrações menores de etano, seguido de propano e butano, à medida que se afasta do local de geração ou do reservatório.

Embora de difícil constatação, as evidências de uma concentração anômala de gás em superfície são bastante dependentes das características geológicas e hidrogeológicas do local, sendo na maioria das vezes reconhecidas indiretamente através de alterações impressas nos solos e/ou na cobertura vegetal. A existência de corpos de água nos locais de exsudações de gás pode causar borbulhamento, facilitando sua constatação.

2.4 - ALTERAÇÃO GEOQUÍMICA DOS SOLOS CAUSADA PELA PRESENÇA DE HIDROCARBONETOS GASOSOS

Os HCs reagem com os solos alterando suas características químicas originais. Donovan (1974), em estudos realizados no Campo de Cement, e posteriormente Sabins (1987) nos campos de Cement e Velma-Oklahoma-EUA, abordaram a alteração de rochas devido à presença de HCs em superfície. Esses autores observaram que os arenitos tipicamente vermelhos que afloram na região têm sua cor mudada para cinza e castanho sobre os campos de petróleo. A mudança de coloração, neste caso, foi atribuída à redução química do ambiente, que teria transformado os óxidos e hidróxidos férricos (hematita e limonita), de cor vermelha, em compostos ferrosos (magnetita e outros), de cores acinzentadas, além de cimentação anormal causada pela precipitação de carbonatos. Adicionalmente, o anticlinal de Velma mostra uma alta concentração de pirita e marcassita. Oehler *et al.* (1984) documentaram processos parecidos no campo de Ashland, Oklahoma, causados por microexsudações de HCs.

O primeiro efeito da presença de HC no solo é indireto e consiste na sua biodegradação por organismos aeróbicos e anaeróbicos. Numa primeira etapa, a migração ascendente de moléculas de HCs faz com que estas ocupem espaços oxigenados nos poros dos solos próximo à superfície. Nestas zonas, bactérias aeróbicas e fungos oxidam seletivamente as parafinas (Jobson *et al.*, 1978) e quebram preferencialmente as fracas ligações de carbono, produzindo água e dióxido de carbono.

O dióxido de carbono gerado pela biodegradação aeróbica torna-se passível de reação, podendo se combinar com água para formar ácido carbônico (Flower *et al.*, 1981). O oxigênio consumido pelos organismos aeróbicos cria um ambiente conveniente para a redução anaeróbica de sulfatos.

Numa etapa seguinte, produtos intermediários como o metanol, formados pela biodegradação aeróbica dos HCs, podem servir de fonte de energia para bactérias redutoras do sulfato (Jobson *et al.* 1978; Oehler *et al.*, 1984). Nesta reação, o metanol pode ser oxidado, reagindo com bicarbonato e sulfato reduzido para formar H₂SO₄ (ácido sulfúrico). Esta substância é altamente reativa e rapidamente forma sulfetos de ferro (pirita e marcasita). quando o elemento ferro encontra-se disponível no ambiente (Oehler *et al.*, 1984). O íon bicarbonato pode reagir com o cálcio para formar calcita ou dolomita ferrosa, ou siderita, na presença de ferro (Donavan, 1974; Donovan & Dalziel, 1977; Oehler *et al.*, 1984).

O potencial de óxido-redução e o pH são os dois fatores primários controladores da mobilização de metais pesados no solo (Reddy *et al.*, 1977; Dalziel & Donavan, 1981). Condições redutoras resultantes do consumo de oxigênio pelas bactérias aeróbicas favorecem ainda mais a mobilização, reduzindo compostos de ferro e manganês, que podem ser lixiviados dos solos, formar complexos orgânicos ou serem facilmente adsorvidos sobre partículas de solo. O ambiente redutor originado pelo aumento das condições de pH favorece a precipitação de carbonato de cálcio (cimentação por calcita), a formação de sulfetos de metais pesados e o aumento da mobilidade de cátions de metais pesados.

Donovan *et al.* (1974) constataram sobre o campo petrolífero de Cement, Caddo County, Oklahoma, a formação de magnetita como resultado da redução de hidróxidos de ferro e de hematita, causada pela presença de microexsudações de HCs.

Independente da presença de HCs, a exata condição dos solos irá depender fortemente de fatores externos, como o clima e a composição química original dos sedimentos. Outros fatores importantes a serem considerados são a porosidade, o grau de oxigenação e a profundidade das condições redutoras nos solos. Em solos pouco permeáveis, pobremente oxigenados, a profundidade das condições redutoras pode ser muito mais rasa. Similarmente, a concentração de ácido carbônico e bicarbonato também pode variar. Finalmente, a presença ou ausência de cátions de metal livre e sulfetos metálicos depende inteiramente da concentração existente no sedimento original. Se não há presença de metais para iniciar os processos, nada poderá ser associado à presença de HCs (Oehler *et al.*, 1984).

2.5 - EFEITOS DOS HIDROCARBONETOS GASOSOS NAS PLANTAS

Hidrocarbonetos são tóxicos para plantas somente em concentrações muito altas (Flower *et al.*, 1981), embora os efeitos secundários causados pela biodegradação do HC possam ser bastante evidentes. Os fatores predominantes que influenciam o crescimento da vegetação sob a ação de microexsudação de HCs são: a disponibilidade de oxigênio. a concentração de dióxido de carbono, a disponibilidade de metais pesados e a diminuição potencial da porosidade dos solos devido à cimentação carbonática (Donovan 1974, Flower *et al.* 1981, Donovan *et al.* 1981, Dalziel & Donovan 1981, Lang *et al.* 1984).

Davis (1977) pesquisou as alterações que ocorrem em solos submetidos à presença de gases e constatou que, após um período de escape de gases, a concentração de oxigênio no solo torna-se extremamente baixa (oxidação do metano causada pela presença de bactérias aeróbicas), levando à debilidade e posterior morte da vegetação.

Flower *et al.* (1981) investigaram o efeito da alta concentração de metano em plantas existentes sobre aterros sanitários. Em pesquisa feita em laboratório, os autores fumigaram duas espécies de *maple* (popularmente conhecido como boldo), o vermelho (*Acer rubrum*) e o branco (*Acer saccharum*), com um gás composto por 3% de oxigênio, 40% de dióxido de carbono, 50% de metano e 7% de nitrogênio, observando a ocorrência de clorose e queda prematura de folhas em ambas as espécies. O *maple* vermelho, que é mais propício a condições de solos alagados, foi mais tolerante àquela mistura de gás. Outra experiência, usando tomates, demonstrou que uma resposta tóxica somente acontecia quando a concentração de oxigênio diminuía e a concentração de dióxido de carbono aumentava, devido à metabolização do metano pelas bactérias. Eles observaram que a sensibilidade ao dióxido de carbono variava de uma espécie para outra, sugerindo que algumas plantas, possívelmente adaptadas a tolerar condições de solos inundados ou plantas com sistemas de raízes rasas, poderiam estar aptas a crescer em solos ricos em metano.

Similarmente, Rock (1984) e Lang *et al.* (1984) documentaram espécies com tolerância ao metano. Eles notaram uma forte correlação entre a distribuição de *maples* e a concentração de HCs ($C^1 - C^4$) presentes intersticialmente no solo. Esse autores levantaram a hipótese de que os *maples* demonstravam uma tolerância alta em condições de solo redutor e conseguiam sobreviver nessas condições adversas devido à presença de <u>mycorrhizal fungi</u> (tipo de fungo que se desenvolve na raiz de plantas superiores), que coexiste simbioticamente com os *maples*, e também devido ao sistema de raízes rasas destas plantas.

Respostas fenológicas e físicas também foram observadas. Kartsev (1959) documentou um padrão anormal de florescência e gigantismo em plantas que cresceram sobre solos ricos em betume e óleo na antiga União Soviética. Resultados similares são documentados por Brooks (1983). Dalziel & Donovan (1981) documentaram aumento da razão ferro/manganês em <u>Pinus ponderosa</u> (espécie de pinus) e <u>Artemisia tridentata</u> (um arbusto do deserto) no campo de óleo de Recluse, Wyoming. A alta razão ferro/manganês foi atribuída a diferenças de solubilidade entre os dois_elementos. O ferro é mais do que dez vezes menos solúvel do que o manganês (Krauskopf, 1979). Embora estas colocações tivessem sido feitas apenas como hipóteses, uma quantidade maior de ferro do que manganês poderia ser trapeada nos solos sob a forma de carbonatos e, neste sentido, uma maior quantidade de manganês estaria disponível para assimilação das plantas.

Lang *et al.* (1984) documentaram mudanças físicas no crescimento de *sagebrush* (arbusto do deserto) em solos com elevadas concentrações de HCs no Campo de Patrick Draw, Wyoming. Eles notaram que as plantas crescidas sobre as anomalias eram menores, menos densas e atrofiadas. Cortes realizados nas folhas demostraram mudanças fisiológicas na sua estrutura. Nos pecíolos das folhas, os cortes mostraram redução do seu diâmetro, que os autores supuseram ser uma resposta à deficiência em zinco, como resultado da reduzida disponibilidade desse metal em solos alcalinos sobre anomalias de HCs. Essas áreas também mostraram uma menor incidência de gramíneas durante o ano.

2.6 - O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA DETECÇÃO DE HIDROCARBONETOS EM SUPERFÍCIE

Uma revisão na literatura existente sobre o uso do sensoriamento remoto na detecção superficial de HCs mostra que a preocupação principal consiste em estabelecer quais os tipos de alterações superficiais, passíveis de serem identificadas através de recursos de sensoriamento, poderiam ser produzidas pelas exsudações de HCs, bem como no estabelecimento de suas dimensões. Essa preocupação é fundamental , devido ao fato de que uma emanação de HC só poderia ser detectada por sensoriamento remoto nas regiões da radiação visível e infravermelho refletido (entre 400 e 2.500 nm), se causasse algum tipo de alteração na superfície do terreno, ou seja, nas rochas, solos e/ou na cobertura vegetal.

Em rochas e solos, por exemplo, uma certa quantidade de óleo poderia causar mudanças na mineralogia e, conseqüentemente, no comportamento espectral desses materiais (como por exemplo, a mudança na coloração natural). Tais mudanças são passíveis de detecção, tanto nas faixas de comprimento de onda da porção visível (VIS - 400 a 700 nm) e

do infravermelho próximo (NIR - 700 a 1.000 nm) do espectro eletromagnético, quanto no infravermelho de ondas curtas (SWIR - 1.000 a 2.500 nm). Sensores remotos atualmente existentes, como o LANDSAT TM (*Thematic Mapper*), possuem bandas espectrais cobrindo essas regiões do espectro eletromagnético (EEM), podendo potencialmente ser utilizados para estudar a distribuição em superfície e identificar a ocorrência de alguns grupos de minerais. entre estes, os argilo-minerais, óxidos e hidróxidos férricos, carbonatos, sulfatos e sílica.

Com relação ao escape natural de gases, sua constatação é mais difícil, mesmo diretamente na superfície, devido à impossibilidade de observação da ocorrência de gases. No caso da área de estudo, por exemplo, a exsudação de gás existente ao longo do rio Paracatu foi constatada em função dos borbulhamentos ao longo de suas margens. Nos outros locais, longe da influência de corpos d'água, espera-se que o uso de imagens do LANDSAT TM aumente a capacidade de detecção das feições superficiais originadas das emanações gasosas. devido à habilidade do sensor utilizado em caracterizar pequenas alterações na cobertura vegetal (densidade da cobertura vegetal) e mudanças no comportamento espectral dos solos. Há que se levar em conta, porém, as limitações impostas pela resolução espectral do sensor, uma vez que o LANDSAT TM possui apenas seis bandas na porção refletida do EEM, cada uma delas cobrindo uma faixa larga de comprimentos de onda. Com essa resolução espectral, não é possível caracterizar detalhadamente o comportamento espectral de minerais presentes em rochas e solos.

A dimensão típica das feições originadas pela exsudação de HCs é também um fator importante a ser considerado, tendo em vista as limitações impostas pela resolução espacial dos sensores disponíveis atualmente. O sensor utilizado neste trabalho, LANDSAT TM, possui resolução espacial de 30 metros (bandas do espectro óptico) e, portanto, não se deve esperar que feições superficiais menores do que 30 metros, em pelo menos uma de suas dimensões, sejam identificadas.

Na literatura pesquisada, o uso do sensoriamento remoto na identificação das alterações fisiográficas produzidas pela exsudação de gás e/ou óleo é discutido em alguns trabalhos, sumarizados a seguir.

Técnicos da Earth Satellite Corporation (1983) detectaram áreas esbranquiçadas dentro de uma unidade arenosa de coloração avermelhada sobre uma estrutura anticlinal em Lisbon Valley, no estado de Utah, EUA, usando o sensor aeroportado *Thematic Mapper Simulator* (TMS). Essas anomalias estavam localizadas em áreas produtoras de HCs e presumiu-se que sua ocorrência era devida ao aumento da solubilidade e mobilidade do óxido de ferro, causado pelo efeito redutor da presença de HC gasoso nas rochas sedimentares.

Patton & Manwaring (1984) delinearam anomalias tonais em imagens LANDSAT MSS (*Multi-Spectral Scanner*)em regiões dos condados de Grant, Stanton, Hamilton e Kearny, localizados no Sudeste do estado de Kansas, EUA, e constataram que elas coincidiam com microexsudações de gás detectadas em superfície. Estas anomalias ocorriam ao longo de lineamentos coincidentes com a falha Syracuse e fraturas associadas. Os autores interpretaram a exsudação de HCs como a provável causa das mudanças no comportamento espectral do solo e da vegetação.

Em estudo realizado no Campo de Lost River, West Virginia, EUA (área florestada dos Apalaches), Rock (1984) e Lang *et al.* (1985b) notaram, através de imagens do TMS. presença anômala de árvores do tipo *maple* em áreas normalmente ocupadas por carvalhos e *hichory*. Levantamentos do conteúdo de gás no solo indicaram presença anormal de metano, etano, propano e butano, coincidentes espacialmente com as áreas de ocorrências anômalas de *maple*, fato que poderia ter inibido o crescimento dos outros tipos de árvores. Embora o *maple* encontre, em regiões de emanações de gás, condições favoráveis para o seu desenvolvimento. a presença de HC gasoso causa o estressamento ou mesmo a morte da maioria dos vegetais.

Lang *et al.* (1985a), trabalhando no campo de Patrick Draw-SW, Wyoming (EUA), localizaram uma anomalia na vegetação natural (*sagebrush*), na margem oeste do campo de produção. A vegetação nesta localidade encontrava-se pouco desenvolvida e com folhas pequenas, produzindo uma anomalia tonal em imagens do LANDSAT MSS e LANDSAT TM , indicando a presença de concentrações anormais de gás no solo.

Carter & Koger (1988) utilizaram imagens LANDSAT MSS e TM para identificar áreas geoquimicamente alteradas em razão da presença de microexsudações de HCs nos municípios de Runnels e Coleman, Texas (EUA). Partindo de feições estruturais de superfície, interpretadas nas imagens em escala regional, foi observada a presença de anomalias tonais associadas a alterações geoquímicas em rochas, solos e vegetação. Neste caso, observou-se também uma forte associação com anomalias magnéticas em uma das áreas estudadas, causadas pela presença de magnetita em superfície. Tal mineral, segundo os autores, teria se formado em conseqüência da existência de um ambiente redutor, comum em locais de microexsudações de HCs, a partir da redução de óxidos férricos hidratados (limonita) e da hematita.

Reid *et al.* (1988) relataram resultados de um estudo usando imagens multiespectrais geradas por um sensor aeroportado de alta resolução espectral (Moniteq/FLI) no Campo de Stoney Point, bacia de Michigan (EUA), com a finalidade de detectar anomalias geobotânicas relacionadas a emanações de metano, etano, propano e butano. Neste caso. a presença de estresse na vegetação foi verificada através de mudanças no comportamento espectral da vegetação.

Malhotra *et al.* (1989) observaram anomalia mineralógica associada com exsudação de HCs na bacia de Bighorn, Wyoming (EUA). Neste caso, foi constatada, através de imagens LANDSAT TM e dados de espectrometria de campo, uma anomalia espectral originada provavelmente pela lixiviação de caulinita e óxidos férricos (hematita e goetita). No entanto, a detecção por sensoriamento remoto de tais anomalias só foi possível em áreas onde a vegetação era esparsa.

Simpson *et al.* (1989 e 1991), utilizando o ATM (*Airborne Thematic Mapper*), detectaram uma anomalia espectral de 6 por 1,5 quilômetros de dimensão, localizada sobre arenitos do campo de gás de Palm Valley, na Austrália Central. Os autores relataram que a anomalia, mostrando níveis de reflectância diferenciados, poderia ter sido causada por alterações superficiais, resultado de um longo processo de exsudação de HC gasoso. Esta anomalia teria sido o resultado conjunto da coloração diferenciada detectada nas rochas alteradas, da anomalia geobotânica existente no local e também da precipitação de carbonatos secundários (calcrete) dentro das fraturas da rocha, devido à mudança de pH do solo. Dados

do sensor MSS sobre o Campo de Palm Valley também foram utilizados pelos autores, mas não foram detectadas tais anomalias.

No Brasil, ainda não existem estudos conclusivos sobre as alterações causadas pela presença de HCs em superfície. Cunha (1979 e 1982) e Miranda & Cunha (1981) em trabalhos realizados na região do rio Juruá, Bacia do Solimões, mostraram possíveis relações entre anomalias da cobertura vegetal (comunidade vegetal menos densa do que a existente em áreas circunvizinhas), detectadas através do emprego de técnicas de classificação nãosupervisionada sobre imagens LANDSAT MSS, e a presença de gás em superfície, evidenciada por levantamento geoquímico. Mello et al. (1996) escreveram sobre a prospecção de HCs na floresta amazônica e mostraram que as anomalias de vegetação anteriormente identificadas e demarcadas na região do Rio Juruá, apresentam forte correlação entre os trends estruturais, que condicionam os campos paleozóicos de condensado e gás, e as anomalias geoquímicas de HCs e microbiológicas identificadas na superfície da região. Embora estas anomalias de vegetação possam estar relacionadas aos efeitos indiretos causados pela presença de HCs em superfície, a morfologia do relevo, que condiciona uma superfície tabular de idade Pleistocênica e na qual ocorrem produtos de alteração como bauxita e lateritas (Oliveira et al. 1977), também pode estar interferindo no aparecimento de tais feições na cobertura vegetal. Procedimentos semelhantes foram adotados sobre a região produtora do rio Urucu, localizada na mesma bacia e que permanece ainda como uma área de grande potencial para avaliação do uso de sensoriamento remoto na detecção dos efeitos causados pela presenca de HCs em superfície. Cabe mencionar que, em áreas da floresta equatorial amazônica, onde o fator umidade (elevada disponibilidade de água) predomina de maneira indiscutível, tal relação ainda carece de estudos mais aprofundados, necessitando para isto da disponibilização de recursos e aquisição de dados de sensores mais modernos.

Existe atualmente em andamento no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES), da PETROBRAS, um projeto de pesquisa, na porção norte da Bacia do Tucano (Nordeste do Brasil), baseado na integração de dados de sensoriamento remoto com geoquímica de superfície, com o objetivo de detectar eventuais mudanças impostas pelas exsudações de HCs.

2.7 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO SOLO E DA VEGETAÇÃO

Antes de iniciarmos o próximo capítulo, será feita uma breve explanação sobre as propriedades espectrais do solo e da vegetação.

Uma das porções do espectro eletromagnético mais utilizadas em sensoriamento remoto está localizada entre 400 a 2.500 nanômetros, abrangendo as regiões do visível e infravermelho próximo (VNIR - de 400 a 1.000 nm) e a do infravermelho do ondas curtas (SWIR - 1.000 a 2.500 nm). São nestas duas regiões que se localizam as feições típicas de absorção que irão caracterizar os minerais, as rochas, os solos e a vegetação (Drury, 1993).

O comportamento espectral de um determinado material é definido como o resultado das medidas de reflectância ao longo do espectro eletromagnético. Alguns materiais absorvem intensamente a energia em comprimentos de onda específicos, definindo, assim, bandas de absorção de energia eletromagnética que serão, na maioria das vezes, responsáveis pela caracterização de um determinado alvo.

O comportamento espectral dos solos é, de uma forma genérica, função principalmente da sua composição mineral, granulometria, porcentagem de matéria orgânica, umídade e da sua capacidade de troca catiônica (Rosa, 1992).

Levando-se em consideração as mudanças de coloração e a possível mudança composicional observada nos solos presentes nas áreas de influência dos HCs gasosos. conforme descrito na literatura e constatado na área de estudo, os óxidos e hidróxidos de ferro, assim como os argilo-minerais, compõem os constituintes básicos que deverão ser avaliados neste estudo. Rowan (1972), Rowan *et al.* (1974), Rowan *et al.* (1977), Abrams *et al.* (1977) e Hunt & Ashley (1979) mostram que tanto os óxidos, como os minerais contendo a molécula hidroxila (O-H), podem ser caracterizados por sensores remotos que captam a radiação eletromagnética compreendida entre a faixa do EEM localizada entre 400 e 2500 nanômetros.

46

No caso dos óxidos/hidróxidos férricos (Fe³⁺), sua presença pode ser constatada no intervalo de 400 a 1.000 nanômetros, através de feições típicas de absorção, causadas por processos eletrônicos de transferência de carga e efeito do campo cristalino dos íons que compõem os minerais (Hunt & Salisbury, 1970). Estas feições de absorção encontram-se localizadas na região de 450, 650 e entre 850-950 nanômetros.

Conforme relatado por Hunt & Salisbury (1970), curvas mostrando feições de absorção centralizadas em 450, 650 e 940 nanômetros são características do mineral goetita. A hematita mostra feições de absorção características, centradas em 510 e 850 nanômetros e a jarosita feições bem marcadas em 450 e 900 nanômetros.

Crósta (1990) mostrou que a predominância de hematita sobre a goetita faz com que a feição de absorção se posicione mais próxima a 850 nanômetros, assim como quando a quantidade de goetita predomina sobre a hematita, a feição tende a se posicionar mais próxima a 950 nanômetros. Em regiões de clima sub-tropical e tropical, é comum a presença de coberturas contendo limonita, constituída de uma mistura de proporção variada de hematita e goetita, na maioria das vezes com baixo grau de cristalinidade, e que muitas vezes é descrita erroneamente na literatura de sensoriamento remoto como sendo um único mineral de composição definida. A Figura 2.5 mostra as principais feições associadas aos processos de transferências eletrônicas dos óxidos e hidróxidos férricos.

Na faixa do infravermelho de ondas curtas, mais precisamente entre 1.400 e 2.500 nanômetros, as feições de absorção encontram-se relacionadas a processos de transição vibracional de moléculas do grupo das hidroxilas (OH)⁻, sendo possível discriminar argilominerais como a caolinita, montmorilonita, sericita-muscovita, clorita, entre outros. As principais feições de absorção que ocorrem nesta faixa do espectro estão localizadas em aproximadamente 1.400, 1.900 e 2.200 nanômetros. A caolinita apresenta uma dupla feição de absorção por volta de 1.400 e de 2.200 nanômetros, além de uma feição de absorção característica em 1.900 nanômetros. Já a montmorilonita e a sericita-muscovita apresentam feições simples de absorção localizadas em 1.400 e 2.200 nanômetros, causada pela presença de moléculas de água na sua estrutura interna. A sericita-muscovita também
apresenta uma feição de absorção localizada em 1.900 nanômetros, porém menos intensa que a feição existente na caolinita. A Figura 2.6 mostra as curvas espectrais características dos argilos-minerais descritos acima. Um dos problemas presentes na interpretação das inflexões das curvas de argilo-minerais é que a água também apresenta fortes feições de absorção posicionadas em 1.400 e 1.900 nanômetros (Drury, 1993).

Com relação ao comportamento espectral da vegetação, seu comportamento irá variar de acordo com suas características físicas e químicas

Na região do visível, a reflectância da vegetação é relativamente baixa, devido à forte absorção da radiação causada pelos pigmentos do grupo da clorofila. Nesta faixa ocorrem duas bandas de absorção bem definidas, localizadas em 480 nanômetros (absorção pelos carotenos) e em 680 nanômetros (absorção causado pela clorofila no processo fotossintético). Ainda nessa faixa, ocorre um pico de reflectância em torno de 500 nanômetros, correspondente à faixa do espectro relacionada à cor verde, fato que explica a coloração verde das plantas.

Na faixa entre 700 e 1.300 nanômetros, a reflectância da vegetação aumenta drasticamente, atingindo valores da ordem de 40%. Esta mudança de nível de reflectância é função da estrutura interna celular da folha e tem papel importante no equilíbrio energético da vegetação, fazendo com que ela não se aqueça e evitando desta forma a destruição da clorofila. Nos comprimentos de onda superiores a 1.300 nanômetros, ocorre um decréscimo dos níveis de reflectância, devido à presença da água, que possui picos de absorção localizados em 1.400 e 1.900 nanômetros. Isso faz com que uma vegetação sadia e turgida possua níveis de reflectância inferiores à uma vegetação seca ou estressada.

Convém ressaltar que tais considerações feitas sobre a vegetação referem-se a uma folha verde isolada e sadia, não sendo possível extrapolar este comportamento de forma direta para uma planta inteira ou para uma cobertura vegetal. Segundo Rosa (1992), em termos percentuais, a reflectância da cobertura vegetal é consideravelmente menor do que a de uma folha verde isolada, devido a fatores como a influência de superfícies desfolhadas, mudanças no ângulo de iluminação, orientação das folhas e ainda a quantidade de solos expostos. De

uma forma geral, a medida da reflectância da vegetação depende de uma série de fatores tais como as condições atmosféricas, espécie, tipo de solo, estado fenológico, densidade da cobertura vegetal, características das folhas (forma, posição, quantidade de água, tipo de pigmentação, estrutura interna, idade, etc.), geometria da medida, tipo de sistema sensor e cobertura da copa.

As alterações químicas dos solos induzidas pela presença de HCs gasosos produzem reflexos diretos na cobertura vegetal, alterando suas características morfológicas e, conseqüentemente, suas características espectrais. Espectros de laboratório (Chiu & Collins 1978, Chang & Collins 1983) mostram que os efeitos tóxicos de alguns metais (estresse geobotânico) causam mudanças espectrais passíveis de serem notadas através de detecção remota. O estresse geobotânico também pode ser causado em áreas onde haja concentrações altas de elementos tóxicos solúveis (Cu, Pb, Zn, Ni, Co e U), sendo sua solubilidade influenciada pela instalação de um ambiente redutor gerado pela presença de HCs. No caso da deficiência em ferro, a síntese da clorofila é prejudicada (o Fe constitui elemento importante na composição das moléculas de clorofila, tendo papel destacado na absorção da radiação eletromagnética), resultando geralmente na inibição do crescimento da vegetação e clorose parcial das folhas, podendo até mesmo causar o não desenvolvimento da cobertura vegetal sobre estas áreas.

Na maioria dos casos, a vegetação estressada tem sua reflectância acentuada na faixa de 650 a 700 nanômetros, devido ao decréscimo da capacidade da planta de produzir clorofila. No entanto, a detecção de estresse geobotânico em áreas de cobertura florestal torna-se uma tarefa difícil quando há uma diversidade de espécies, sendo necessária, nestes casos, uma grande quantidade de dados para se isolar uma anomalia geobotânica.

A título de ilustração, a Figura 2.7 mostra algumas curvas de comportamento espectral de folhas com diferentes colorações e as faixas correspondentes às bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM.

Dentro do caráter investigatório deste trabalho e levando-se em consideração as exposições feitas anteriormente, serão descritas nos próximos capítulos as várias etapas desta

pesquisa. Partindo-se da premissa de identificar e caracterizar as possíveis alterações indiretas ocasionadas pelas emanações de HCs gasosos na região do Remanso do Fogo, foram utilizadas, integradamente, informações de geoquímica de superfície, de imagens LANDSAT TM, de curvas espectrais do solo e do dossel da floresta de eucaliptos (análise espectral). do levantamento de parâmetros biométricos, de dados estruturais da região e de informações obtidas por simulação (em laboratório) de fluxo forçado de HCs gasosos em amostras de solo e vegetação para tal propósito.



Figura 2.5 - Gráfico mostrando as principais feições associadas aos processos de transferências eletrônicas dos óxidos e hidróxidos de ferro e as faixas correspondentes às bandas 1, 2 3 e 4 do LANDSAT TM (gráfico extraído de Drury, 1993).



Figura 2.6 - Curvas espectrais características dos argilo-minerais caolinita, montmorilonita e muscovita com as bandas 4, 5 e 7 do LANDSAT TM (gráfico extraído de Drury, 1993).



Figura 2.7 - Curvas de comportamento espectral de folhas de diferentes colorações e as faixas correspondentes às bandas 1, 2, 3, e 4 do LANDSAT TM. 1 - Folha verde escuro; 2 - folha verde amarelo claro; 3 - folha vermelha alaranjado; 4 - folha marrom e 5 - folha morta (gráfico extraído de Drury, 1993).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA DE TRABALHO

CAPÍTULO 3

MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados os materiais listados a seguir:

- Mapas de anomalias geoquímicas de HCs (metano, etano e HCs mais pesados que etano)
- Mapa de anomalia Bouguer (Mapa gravimétrico)
- Perfil sísmico (linha 240-RL-060)

• Base cartográfica do Serviço Geográfico do Exército (SGE) na escala 1:100.000 - Folha Santa Fé (SE.23-V-B-VI)

- Imagens LANDSAT TM
- Softwares:
- ER-MAPPER
- GEOSOFT
- AUTOCAD
- STEREONET
- Equipamentos:
- Espectroradiometro Beckman UV-5240
- Radiometro SPECTRON SE-590
- Plant Canopy Analyzer LAI-2000
- Helicóptero Esquilo/Helibrás da Força Aérea Brasileira
- Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado (SADA)
- Bússola Breithaupt

• Materiais utilizados na simulação do fluxo forçado de HCs gasosos em amostras de solo e vegetação:

- 3 mesas de ferro

- 30 recipientes plásticos de 10 litros cada
- Tubos e conexões de PVC de 3/8 polegada
- Mangueira para gás de cozinha reforçada com fios de nylon
- Mangueira plástica de 1/2 centímetro de diâmetro
- 20 erlenmayers de 1 litro
- Rolhas perfuradas de borracha
- 60 registros de gás de cozinha
- 2 feixes de cilindros de gás com capacidade para 114 m³ cada
- 1 mangueira AEROQUIP de alta pressão
- 2 válvulas de alívio de pressão
- Braçadeiras metálicas
- Tubos de vidro de 4 e 6,4 milímetros de diâmetro
- Parafusos vazados de latão com 6 milímetros de diâmetro interno
- Redutores de latão
- Discos de vidro de ½ centímetro de espessura e 20 centímetros de diâmetro
- Cola siliconizada para vedação
- Pedra britada
- Sombrite
- Trado de aço inoxidável de 30 centímetros de comprimento

- Equipamento para medição do potencial redox do solo \rightarrow voltímetro, eletrodo de platina, eletrodo de calomelano e phmetro

A Figura 3.1 mostra alguns dos materiais utilizados no experimento.



Figura 3.1 - Materiais utilizados no experimento. 1 - Recipiente plástico com capacidade de 10 litros mostrando parafuso vazado de latão na base. 2 - Prato plástico perfurado com parafuso vazado de latão na lateral. 3 - Disco de vidro. 4 - Registro de gás de cozinha. 5 - Erlenmayer de 1 litro. 6 - Trado manual de aço inoxidável para uso em pequenos recipientes. 7 - Rolha de borracha perfurada com tubos de vidro dobrados. 8 - Mangueira plástica de baixa pressão com 1/2 centímetro de diâmetro. 9 - Mangueira de borracha reforçada com fios de nylon. 10 - Tubos e conexões de PVC com redutores de latão.

3.2 – METODOLOGIA DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho deu-se em várias etapas que tiveram início com as constatações preliminares de campo, seguidas do estudo mais aprofundado das exsudações de HCs, da utilização das imagens LANDSAT TM, da análise espectral de amostras de solo e do dossel da floresta de eucaliptos, da obtenção dos fatores de reflectância aparente das imagens LANDSAT TM, do levantamento dos parâmetros biométricos da vegetação e estimativas de área foliar, do levantamento de elementos estruturais de campo e do estudo em laboratório do efeito do fluxo forçado de HCs gasosos em amostras de solo e vegetação. A seguir serão descritas as etapas de trabalho desta pesquisa.

3.2.1 - CONSTATAÇÕES PRELIMINARES DE CAMPO

Com base em hipóteses levantadas pelo autor e com a ajuda dos mapas de iso-valores padronizados de HCs gasosos, foi realizada em outubro de 1993 uma rápida campanha de campo na região de Cachoeira do Manteiga. Esta campanha teve por objetivo a verificação de possíveis alterações fisiográficas causadas pela presença dos HCs gasosos em superfície.

Sobre a cobertura arenosa localizada na confluência dos rios São Francisco e Paracatu, observou-se, dentro das áreas de plantio de eucaliptos, a existência de locais onde a vegetação não se desenvolvia ou, quando se desenvolvia, o fazia de modo bastante irregular. observando-se apenas a existência esparsa de gramíneas. Na ocasião foi verificado que tais ocorrências tinham relação com as áreas de influência dos gases termoquímicos, conforme indicava os mapas de anomalias geoquímicas de HCs gasosos.

Comparando-se duas outras áreas adjacentes, foram observadas diferenças significativas em eucaliptos de mesma idade (2 anos), relativas ao tamanho dos espécimes e na densidade da cobertura. No local de ocorrência de gás, os eucaliptos apresentavam-se pouco desenvolvidos e com baixa densidade de cobertura vegetal (Figura 3.2), diferente das áreas circunvizinhas onde a densidade era bem maior e os indivíduos mais desenvolvidos e saudáveis (Figura 3.3).

55



Figura 3.2 - Aspecto da plantação de eucaliptos com 2 anos de idade localizada dentro da região de influência dos hidrocarbonetos gasosos. Observe a pequena densidade da cobertura vegetal, a pequena altura das árvores e a coloração acinzentada do solo.



Figura 3.3 - Área da plantação de eucaliptos com dois anos de idade localizada fora da área de influência dos hidrocarbonetos gasosos. Observe que a densidade da cobertura vegetal é maior quando comparada com a foto da Figura 3.2, assim como a altura das árvores. Neste local a coloração do solo é marrom-avermelhado.

Ainda com relação à vegetação, observou-se que a grande maioria das folhas dos eucaliptos localizadas dentro das áreas de anomalias gasosas apresentavam nítidos sinais de deficiência nutricional, quando comparadas com folhas sadias coletadas fora das áreas de influências destes gases, conforme ilustrado nas fotos das Figuras 3.4 e 3.5.

Além desses fenômenos observados na cobertura vegetal, constatou-se que, em algumas das áreas indicadas pelos mapas de anomalias geoquímicas de HCs, os solos arenosos apresentavam uma coloração acinzentada, diferente da coloração marrom-avermelhada das áreas circunvizinhas. Neste caso, a diferença de coloração poderia estar relacionada com a solubilização e posterior mobilização de óxidos e hidróxidos férricos existentes no solo devido à presença dos HCs, conforme outras ocorrências de *seeps* descritos na literatura, embora outros fatores supergênicos também pudessem propiciar tais alterações. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram a diferença de coloração dos solos existentes em locais sujeitos à presença dos gases e de solos posicionados fora dos locais de influência, respectivamente.

Segundo os engenheiros florestais responsáveis pelo reflorestamento de eucaliptos da empresa Minas Ligas, proprietária das plantações de eucaliptos da área de estudo, constatouse - já nos primeiros plantios, realizados no final da década de 70 - um desenvolvimento bastante irregular dos indivíduos em algumas das áreas plantadas. Devido ao baixo rendimento apresentado nessas áreas, as árvores foram cortadas sem que fossem estabelecidos os motivos pelos quais a plantação não havia se desenvolvido. Após intensa fertilização do solo, os eucaliptos foram replantados, mas mesmo assim persistiram as mesmas porções onde a cultura não se desenvolvia, ao mesmo tempo em que os solos continuavam mostrando deficiências em nutrientes.

3.2.2 - EXSUDAÇÕES DE GÁS DA REGIÃO DO REMANSO DO FOGO E A GEOQUÍMICA DE HIDROCARBONETOS GASOSOS

Conforme mencionado no relatório interno da PETROBRAS (Melo & Jesus, 1987), as exsudações de gás da região do Remanso do Fogo são há muito tempo conhecidas, existindo inclusive um curso d'água denominado "Riacho do Fogo" nos mapas do Serviço Geográfico do Exército de 1968 (Folha de Santa Fé - SE.23-V-B-VI). Esse riacho está localizado



Figura 3.4 - Folhas de eucaliptos coletadas dentro das áreas de influência dos hidrocarbonetos gasosos comparadas com uma folha sadia. Além dos indícios de deficiência nutricional, observa-se que as folhas encontram-se retorcidas, evidenciando problemas estruturais de formação.



Figura 3.5 - Folhas de eucaliptos coletada dentro da área de influência dos hidrocarbonetos gasosos comparadas com uma folha sadia. A coloração arroxeada é indicativa de deficiência nutricional.



ł

Figura 3.6 - Aspecto superficial do solo de coloração acinzentada situado em área de influência dos hidrocarbonetos gasosos.



Figura 3.7 - Aspecto superficial do solo de coloração marrom-avermelhado situado em área fora da influência dos hidrocarbonetos gasosos.

na margem direita do rio Paracatu, próximo ao local onde se conhece a maior concentração de exsudações de gás da região.

Segundo informações colhidas pelo autor junto aos moradores de Cachoeira do Manteiga, as margens do Rio Paracatu no âmbito da área de estudo eram palco de rituais indígenas utilizando fogo resultante da queima do gás natural. Constatou-se também que os pescadores locais têm o costume de acender fogo nos pontos de borbulhamento de gás para esquentar comida, com auxílio de latas de óleo colocadas sobre as bolhas.

Além dos locais das emanações naturais de gás conhecidos nas margens do Rio Paracatu, existe um poço (Poço do Jacarezinho) de baixa profundidade (~100 metros), perfurado em 1976 pelo Departamento Nacional de Obras Contra Seca (DNOCS), que produz HCs gasosos juntamente com a produção de água, nas imediações de Cachoeira do Manteiga (Fazenda Pé do Morro).

As Figuras 3.8 e 3.9 mostram, respectivamente, as ocorrências de gás na margem do Rio Paracatu e o Poço do Jacarezinho, produzindo água juntamente com o borbulhamento de HCs gasosos, na Fazenda Pé do Morro.

Com base nestas constatações, Babinski & Santos (1987) realizaram campanha de campo com o objetivo de caracterizar geoquimicamente a origem dos HCs gasosos. No caso das exsudações de gás, é muito importante a caracterização da gênese, pois os HCs gasosos que emanam na superfície podem ter duas origens distintas: bioquímica ou termoquímica. No caso da origem bioquímica, os gases são gerados pelos processos de putrefação e decomposição natural de matéria orgânica incorporada aos sedimentos recentes. No caso da origem termoquímica, os gases são gerados pelo craqueamento térmico da matéria orgânica em profundidade. Segundo esses autores, a origem dos HCs gasosos pode ser determinada pelo estudo de razões comparativas dos HCs do tipo metano (C1), etano (C2) e propano (C3), além do estudo da razão isotópica de carbono do gás metano.

Os primeiros resultados das análises genéticas dos HCs gasosos das margens do Rio Paracatu e dos poços da Fazenda das Aroeiras indicaram que estes gases não possuíam origem



Figura 3.8 - Aspecto da emanação natural de gás existente na margem direita do Rio Paracatu (Remanso do Fogo).



Figura 3.9 - Poço do Jacarezinho mostrando o borbulhamento de gases termoquímicos simultaneamente 'a produção de água.

bioquímica; entretanto, encontravam-se classificados fora da área característica dos gases de origem termoquímica, situando-se numa posição intermediária com predominância composicional de HCs gasosos termoquímicos. Os resultados das análises da cromatografia gasosa são apresentados na Tabela 3.1, onde ambas as áreas apresentam composições semelhantes a de gases secos (mais de 95 % de metano), predominando o gás metano. Os resultados da razão isotópica indicaram valores correspondentes ao de gases termoquímicos e os valores das razões comparativas indicaram que os gases da margem do Paracatu possuíam uma maior quantidade de gases bioquímicos.

Como os primeiros resultados apresentaram dúvidas quanto à origem termoquímica destes gases, novas amostras foram coletadas no Poço Jacarezinho no final de 1988, desta vez utilizando metodologia mais aprimorada. Os resultados desta nova análise encontram-se na Tabela 3.2 e, desta vez, os resultados obtidos não deixaram dúvidas quanto à origem termoquímica destes gases.

COMPONENTES	MARGEM DO PARACATU	POÇOS DA FAZ. VALE DAS AROEIRAS
METANO	99,980 %	99,905 %
ETANO		0,065 %
PROPANO	0,018 %	0,030 %
HCs TOTAIS	40,76 %	
DIÓXIDO DE CARBONO	26,58 %	
OXIGÊNIO	7,17 %	
NITROGÊNIO	25,49 %	•

Tabela 3.1ANÁLISE COMPOSICIONAL DAS ESXUDAÇÕES

Tabela 3.2

ANÁLISE DOS GASES DO POÇO JACAREZINHO - FAZENDA VALE DAS AROEIRAS

METANO	63.800,20 ppm	98,06 %
ETANO	496,22 ppm	0,76 %
PROPANO	345,55 ppm	0,53 %
ISSO-BUTANO	11,41 ppm	0,02 %
N-BUTANO	8,38 ppm	0,02 %
PENTANO	4,99 ppm	0,008 %
HEXANO	21,91 ppm	0,03 %
HC MAIS PESADO QUE HEXANO	375,08 ppm	0,58 %

Amostras coletadas em 06/12/88

Com relação às vazões de gases na região, Babinski & Santos (1990) realizaram testes em locais com borbulhamentos e em locais sem a existência de borbulhos e chegaram ao índice médio de vazão acumulada de 52.055 m³/dia para uma área de aproximadamente 600 km², correspondente à área de confluência dos rios São Francisco e Paracatu (Figura 3.10).

Embora facilmente identificadas nas áreas de alta vazão e concentração de gases, as exsudações de HCs gasosos tornam-se pouco perceptíveis nos locais onde existem as coberturas arenosas, devido principalmente à dissipação proporcionada pelos sedimentos sobrejacentes. Neste sentido, técnicos da PETROBRAS realizaram uma campanha de prospeçção geoquímica de superfície sobre as áreas das coberturas arenosas localizadas na região de confluência dos rios São Francisco e Paracatu, com o objetivo de selecionar áreas com concentrações anômalas de HCs na superfície do terreno.

Para a elaboração dos mapas de concentrações anômalas de HCs gasosos, foram coletadas 566 amostras de solos ao longo das estradas e dos carreadores existentes nas áreas de plantio de eucaliptos, conforme ilustrado no mapa da Figura 3.11. Estas amostras foram coletadas de acordo com as normas desenvolvidas pelo corpo técnico do Setor de Geoquímica (SEGEQ) do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES) para prospecção geoquímica de superfície e, posteriormente, submetidas à análise de cromatografia gasosa. Os dados foram tratados e apresentados na forma de curvas de isoconcentração padronizada dos teores de metano, etano e HCs mais pesados que etano que são apresentados na Figura 3.12. Nos mapas apresentados nesta figura, as curvas vermelhas indicam o valor médio da concentração das amostras coletadas e as outras curvas correspondem aos valores médios acrescidos sucessivamente de valores de 0,5 desvio-padrão. os quais foram expressos em partes por milhão (ppm). A adoção de tal procedimento teve por objetivo padronizar as informações dos vários tipos de HCs e fornecer uma visualização mais representativa da distribuição dos gases em superfície. Assim, as curvas brancas, amarelas, azul, magenta e verde correspondem aos valores da média dos pontos levantados para cada gás, acrescidos de 0.5, 1, 1.5, 2 e 2.5 desvios-padrão, respectivamente. As curvas de isoconcentração de propano, butano e pentano não foram utilizadas neste trabalho, devido ao fato de que as informações que lhes são referentes já constam do mapa de iso-concentração de HCs mais pesados que etano.



Figura 3.10 - Índices de vazões medidos nas áreas de exsudações de gás do Remanso do Fogo.



Pontos de Amostragem Geoquímica

Figura 3.11 - Mapa dos pontos de amostragem geoquímica de solos para quantificação dos hidrocarbonetos gasosos.



Figura 3.12 - Curvas de iso-concentrações padronizadas de metano, etano e hidrocarbonetos mais pesados que etano.

66

3.2.3 - O USO DAS IMAGENS LANDSAT TM

Após o diagnóstico inicial de campo, onde foram constatados os prováveis efeitos causados pela presença dos HCs gasosos na superfície do terreno, foram adquiridas imagens do satélite norte-americano LANDSAT 5, com o objetivo de estudar a distribuição espacial das mudanças verificadas nos solos e na cobertura vegetal.

As cenas utilizadas, obtidas junto ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), encontram-se listadas na Tabela 3.3. A aquisição dos produtos em quatro datas diferentes teve por objetivo avaliar temporalmente a distribuição da cobertura de eucaliptos ao longo destes anos, assim como propiciar a visualização da superfície do terreno sem a presença dos eucaliptos, uma vez que no período de 1984 a 1995 foram realizados vários cortes de eucaliptos em porções distintas da área do reflorestamento, não sendo possível contemplar em uma única data de aquisição uma área significativa que propiciasse uma avaliação adequada das mudanças das características dos solos.

ÓRBITA/PONTO	QUADRANTE	DATA	ELEVAÇÃO SOLAR	AZIMUTE SOLAR
219 / 71	S	13/06/1984	36°	24°
219/71	S	01/08/1990	37°	25°
219 / 71	S	24/05/1994	37°	23°
219 / 72	N	12/06/1995	31°	23°

Tabela 3.3 IMAGENS LANDSAT TM UTILIZADAS

As imagens foram adquiridas no Nível 4 (correções radiométricas e geométricas básicas), do INPE em Cachoeira Paulista. Este procedimento teve por objetivo preservar ao máximo a originalidade dos dados radiométricos das cenas adquiridas sobre a área de estudo, proporcionando informações mais precisas sobre o comportamento espectral dos alvos afetados pelos HCs gasosos.

As imagens foram adquiridas na forma de produtos digitais contendo as 6 bandas do espectro refletido do sensor *Thematic Mapper* (TM) do LANDSAT 5 (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7), excluindo-se a banda 6 referente à porção termal do espectro.

As imagens foram processadas através do *software* de processamento de imagens ER-MAPPER, inicialmente na versão 4.1 e posteriormente nas versões 5.1 e 5.2. A etapas de processamento foram realizadas no Laboratório de Processamento de Informações Georeferenciadas (LAPIG) do Instituto de Geociências da UNICAMP.

As técnicas de processamento digital de imagem aplicadas às cenas utilizadas neste trabalho encontram-se amplamente discutidas nos trabalhos de Drury (1987 e 1993), Mather (1987), Sabins (1987), Paradella (1990), Menezes (1991), Crósta (1992) e outros. Hernandes (1994) também expõe de forma simplificada a maioria dos procedimentos básicos de processamento de imagens. Em função do vasto acervo existente sobre os aspectos teóricos relacionados às técnicas de processamento digital de imagens de satélites, procurar-se-á enfatizar apenas os procedimentos utilizados nas várias etapas do trabalho, assim como as discussões dos resultados obtidos.

3.2.3.1 - INFORMAÇÕES ESTATÍSTICAS DAS IMAGENS

Devido às pequenas dimensões da área de estudo (aproximadamente 600 km²), os quadrantes foram cortados em cenas de 1.000 x 1.000 *pixels*, onde foram aplicadas as técnicas de processamento digital de imagem descritas a seguir.

A Tabela 3.4 apresenta os dados estatísticos das imagens, com os valores mínimos e máximos de *digital numbers* (DNs), as médias e os desvios-padrão para as bandas das cenas de 1984, 1990, 1994 e 1995.

Tabela 3.4

ESTATÍSTICA DAS CENAS DE 13/06/1984, 01/08/1990, 24/05/1994 e 12/06/1995 CENA DE 13/06/1984

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
DN MÍNIMO	25	12	11	I	1	1
DN MÁXIMO	255	99	146	114	234	135
MÉDIA	55,131	24,549	28,348	44,361	72,541	23,623
DESVIO- PADRÃO	5,344	4,494	8,844	7,587	22,019	11,304

CENA DE 01/08/1990

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
DN MÍNIMO	44	17	14		1	
DN MÁXIMO	124	85	132	107	230	127
MÉDIA	57,763	26,744	32,081	44,541	80,249	28,265
DESVIO- PADRÃO	5,877	4,817	9,314	7,564	23,577	12,076

CENA DE 24/05/1994

	BANDA I	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
DN MÍNIMO	39	13	10	3	ł	
DN MÁXIMO	142	84	255	103	218	113
MÉDIA	48,474	22,059	24,882	46,644	64,216	17,960
DESVIO-	4,734	4,059	8,272	7,286	20,294	9,335
PADRÃO		and a second		and an		

CENA DE 12/06/1995

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
DN MİNIMO	32	10	9	2.000	1	free and the second
DN MÁXIMO	209	113	150	127	223	118
MÉDIA	44,223	19,980	22,905	41,460	60,448	17,390
DESVIO-	4,745	3,749	7,239	7,408	18,191	8,509
PADRÃO						

Obs.: Valores fornecidos pela.Estatística do ER-MAPPER

3.2.3.2 - CORREÇÃO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS

A atmosfera interfere nos dados obtidos pelos sensores remotos, modificando o fluxo radiante incidente e refletido da superfície terrestre. Este processo ocorre de duas formas (Taranik, 1978): ou subtraindo valores da resposta original de uma cena (absorção atmosférica), ou adicionando valores a esta resposta (espalhamento atmosférico).

As correções destes efeitos podem ser feitas de várias formas, através da aplicação de diversos métodos, cuja complexidade irá variar de acordo com a disponibilidade de informações existes sobre o produto de sensoriamento remoto utilizado e sobre as características da atmosfera na hora da aquisição da imagem. Como não dispomos de dados mais precisos sobre as características da atmosfera nas várias datas de aquisição das imagens, optou-se apenas por corrigir os efeitos causados pelo espalhamento atmosférico, através da aplicação do Método de Subtração do *Pixel* Escuro, proposto por Chavez (1975), minimizando-se, assim, seus efeitos.

Segundo Schowengerdt (1983), a correção do espalhamento atmosférico deve ser feita quando do emprego de análises multi-temporais de imagens, em que o nível de espalhamento varia de uma data para outra, e em situações onde são empregadas operações aritméticas com as bandas da imagem, como por exemplo a razão de bandas.

Conforme metodologia proposta por Chavez (*op. cit.*), foram estimados os valores mínimos de *Digital Numbers* (DN) dos corpos d'água (lagoas) desprovidos de sedimentos e relativamente profundos existentes ao longo dos rios São Francisco e Paracatu.

A Tabela 3.5 mostra os valores mínimos de DNs encontrados e que foram empregados no processo de correção do espalhamento atmosférico para as várias bandas das imagens usadas no trabalho. O procedimento de correção foi feito subtraindo-se o valor de DN mínimo encontrado para cada banda.

Tabela 3.5

CENAS	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 7
13/06/1984	25	12	11	1	1	1
01/08/1990	44	17	14	5	1	1
24/05/1994	39	13	10	3	1	1
12/06/1995	32	10	9	2	1	1

VALORES DE DNs UTILIZADOS NA CORREÇÃO DO ESPALHAMENTO ATMOSFÉRICO

3.2.3.3 - CORREÇÃO GEOMÉTRICA

A correção geométrica teve por objetivo reordenar espacialmente os *pixels* das imagens segundo o sistema UTM (Universo Transverso de Mercator) de coordenadas cartográficas, possibilitando, deste modo, a correlação espacial das imagens com informações oriundas de outras fontes devidamente geo-referenciadas, além de corrigir as possíveis distorções espaciais causadas durante a aquisição da imagem pelo sensor.

O processo de correção geométrica (geo-referenciamento das cenas) consistiu em atribuir um sistema de coordenadas geográficas às imagens, com base na comparação de pontos identificáveis simultaneamente em uma carta topográfica e na imagem. Para isto foram extraídos, com o auxílio de uma mesa digitalizadora, 16 pontos de controle da Folha SE.23-V-B-VI - Escala 1:100.000 (Folha Santa Fé), posteriormente identificados nas imagens e rotulados com as respectivas coordenadas geográficas (ver Tabela 3.6).

A precisão do geo-referenciamento da imagem irá depender da precisão da extração das coordenadas dos pontos de controle e da precisão do posicionamento dos respectivos pontos na imagem. Para facilitar, geralmente são utilizados cruzamentos de estradas ou confluências de drenagens facilmente identificáveis nas imagens e nas folhas planialtimétricas. No caso das imagens LANDSAT-TM, admite-se um erro de precisão cartográfica de até 30 metros, o que corresponde às dimensões do seu campo de visada instantâneo projetado pelo sensor na superfície. A Tabela 3.7 mostra os erros médios quadráticos (RMS) obtidos para as cenas de 1984, 1990, 1994 e 1995 durante o procedimento

71

de geo-referenciamento (todos eles com RMS abaixo de 30 metros) e o número de pontos de controle utilizados (dos 16 identificados) para a transformação de cada imagem.

O procedimento de correção consiste em estabelecer as diferenças de posicionamento entre as coordenadas dos pontos extraídos dos mapas e os pontos selecionados nas imagens. Uma vez fixados os pontos de controle, é feita a transformação das coordenadas X e Y da matriz da imagem para o futuro sistema de coordenadas, definido através de funções polinomiais (polinômio linear, quadrático ou cúbico). No caso deste trabalho, utilizou-se uma transformação através de um polinômio linear.

Com a aplicação da transformação das coordenadas, as células ou *pixels* (elementos de resolução da imagem) irão ocupar uma nova posição espacial, tornando-se necessário calcular o novo valor de DN. Devido às características do estudo, optou-se por um método que preservasse ao máximo os valores de DN da cena original. Para isto, foi utilizado o método de interpolação do vizinho mais próximo, por este ser o que melhor preserva o DN do pixel original.

Após a interpolação, a imagem tornou-se cartograficamente referenciada pelo sistema de projeção UTM, possibilitando a integração com outras informações geo-referenciadas.

3.2.4 - INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT TM COM OS DADOS DE GEOQUÍMICA DE SUPERFÍCIE

Para a integração dos dados analógicos originais - oriundos dos mapas de anomalias geoquímicas de HCs gasosos - com as imagens LANDSAT TM, realizou-se a vetorização destes mapas em mesa digitalizadora, utilizando para isto a função "pline" do *software* AUTOCAD - Versão 10. Após a transformação dos dados analógicos para digitais (geração de arquivos *ASCII DXF*), estes foram importados para o *software* ER-MAPPER, através da sua função de importação de vetores, e sobrepostos às imagens de satélite.

72

PONTOS DE CONTROLE	COORDENADAS E-W (metros)	COORDENADAS N-S (metros)
1	488251	8151923
2	481666	8154208
.3	481802	8156173
4	487150	8167067
S tar age spirit	485288	8168233
6	488721	8167992
	492422	8161051
8	491438	8157386
9	483152	8173325
10	476304	8162442
11	474590	8155098
12	475300	8151743
13	499437	8153238
14	490819	8169762
15	493089	8172669
16	495546	8173742

TABELA 3.6

RELAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE UTILIZADOS

TABELA 3.7

ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS OBTIDOS PELO GEO-REFERENCIAMENTO

IMAGEM	ERRO MÉDIO QUADRÁTICO	PONTOS UTILIZADOS
1984	18 m	13
1990	14 m	13
1994	25 m	12
1995	19 m	13

3.2.5 - INTEGRAÇÃO DOS MAPAS DE HIDROCARBONETOS GASOSOS ATRAVÉS DE COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB

Ainda com a finalidade de caracterizar as áreas de maior concentração de HCs gasosos sobre a região do Remanso do Fogo, foram utilizados recursos básicos da formação de composições coloridas RGB.

O procedimento adotado para esse tipo de integração consistiu da geração de imagens (arquivos tipo *raster*) a partir dos arquivos *ASCII DXF* criados na etapa anterior. Para a transformação destes dados em imagens, foi necessária a elaboração de *grids*, criados a partir do *software* GEOSOFT instalado na PETROBRAS.

Os grids foram gerados com um espaçamento equivalente à média das amostragens realizadas em campo (500 metros), através da interpolação dos pontos pelo método da *Krigagem*. Este método foi escolhido por ter gerado o grid que melhor representou as linhas de iso-valores geoquímicos em comparação com os grids gerados pelos métodos da mínima curvatura e do inverso da distância. Posteriormente, estes arquivos foram importados para o ER-MAPPER, onde foram geradas as imagens de metano, etano e gases mais pesados que etano, cujos teores relativos, anteriormente representados na forma de linhas de iso-valores, passaram a ser representados na forma de superfícies contínuas em níveis de cinza (níveis de cinza representam altas concentrações e níveis de cinza escuro, baixas concentrações de gases). As vantagens da utilização de variáveis usualmente representadas na forma de curvas de iso-valores em imagens *raster*, assim como o seu processamento e a interpretação com o auxílio de técnicas de processamento de imagens, foram amplamente discutidas por Drury (1987) e Crósta (1990).

3.2.6 - APLICAÇÃO DO ÍNDICE NORMALIZADO DE DIFERENÇA DE VEGETAÇÃO (NDVI) À ÁREA DE PLANTIO DE EUCALIPTOS

A vegetação é caracterizada espectralmente por apresentar uma absorção intensa da radiação eletromagnética na região do espectro correspondente ao vermelho e uma intensa reflexão no infravermelho próximo, ambas causadas pela clorofila. Devido a essas características peculiares de comportamento espectral da vegetação, técnicas de processamento de imagens envolvendo operações aritméticas (razão de bandas) são bastante utilizadas no realce da vegetação e na determinação de parâmetros como biomassa. Para isso, são utilizados os chamados índices de biomassa ou de vegetação. Estes índices tendem a realçar as diferenças entre o mínimo de reflexão, correspondente ao máximo de absorção por pigmentos das plantas e o máximo de reflexão devido à estrutura foliar existentes nas faixas correspondentes às bandas 3 e 4 do LANDSAT TM, respectivamente. Pequenas mudanças no comportamento da vegetação serão bastante realçados numa razão de bandas. Como vantagem adicional, a aplicação das razões de bandas tende a minimizar os efeitos topográficos (efeito luz/sombra).

No caso deste trabalho, a aplicação do Índice Normalizado da Diferença da Vegetação (Banda 4 - Banda 3 / Banda 4 + Banda 3) foi a que apresentou o melhor resultado dentre as várias operações aritméticas testadas no realce da cobertura vegetal da área de plantio de eucaliptos

Para a aplicação do NDVI, foram feitas as devidas correções do efeito causado pelo espalhamento atmosférico na imagem obtida em 24/05/1994, uma vez que a banda 3 é bastante afetada por este fenômeno. Para isto, foram subtraídos dez (10) níveis de cinza da banda 3 e três (3) níveis de cinza da banda 4, cujos valores foram obtidos das lagoas de águas límpidas existentes ao longo das margens dos rios São Francisco e Paracatu.

3.2.7 - APLICAÇÃO DE ANÁLISE POR PRINCIPAIS COMPONENTES (APC) NO REALCE DE FEIÇÕES ASSOCIADAS ÀS EMANAÇÕES DE HIDROCARBONETOS

Entre as feições indicativas da presença de gases na superfície do terreno, a baixa densidade ou a inexistência de cobertura vegetal, assim como as mudanças no comportamento espectral dos solos, parecem ser os fatores mais importantes na utilização de sensoriamento remoto na identificação de parâmetros relacionados às emanações de gás na região. Nesse sentido, foram aplicadas técnicas direcionadas de processamento com o intuito de realçar e identificar áreas portadoras de anomalias espectrais do solo e da vegetação. A técnica

selecionada consistiu na aplicação de análise por principais componentes (APC) sobre as bandas do LANDSAT TM.

Embora amplamente aplicada sobre as imagens de sensoriamento remoto, a análise por principais componentes não é geralmente empregada na plenitude do seu potencial de realce espectral. Segundo Crósta & Moore (1989) e Crósta (1990), este fato decorre geralmente da falta de um entendimento das relações existentes entre o conteúdo de informação espectral de cada principal componente e as características espectrais dos materiais superficiais de interesse. Uma das características desta técnica de maior utilidade é a que possibilita a identificação e a extração seletiva de informações espectrais especificamente relacionadas a determinados tipos de materiais superficiais, dentre todo o conjunto de informações espectrais contidas em imagens multi-espectrais.

A aplicação da APC no realce de feições de interesse foi feita, em parte. por adaptações realizadas sobre a técnica FPCS (*Feature-Oriented Principal Component Selection*), descrita nos trabalhos de Crósta & Moore (1989), Crósta (1990), Crósta & Rabêlo (1993) e Loughlin (1991). A técnica FPCS, também conhecida na literatura como Técnica Crósta (Loughin, 1991), consiste na pré-seleção de dois subgrupos de 4 bandas do LANDSAT-TM, um grupo formado pelas bandas 1, 3, 4 e 5 - utilizado no realce de áreas portadoras de óxidos/hidróxidos de ferro - , e o outro pelas bandas 1, 4, 5 e 7, utilizado no realce de áreas portadoras de minerais com hidroxila. Esses dois grupos de bandas são estatisticamente analisados com base nos coeficientes dos auto-vetores e uma relação é estabelecida entre a contribuição de cada uma das bandas originais e as respectivas imagens principais componentes (PCs), estabelecendo-se em quais PCs irão se concentrar as informações espectrais de interesse.

Neste estudo foram utilizados os conceitos da técnica Crósta para selecionar apenas um grupo de 4 bandas (bandas 1, 3, 4 e 5), com o objetivo de realçar áreas portadoras de óxidos/hidróxidos de ferro. Para o realce das áreas de maior densidade de cobertura vegetal, procedeu-se a APC, utilizando-se as 6 bandas do LANDSAT TM. A APC foi aplicada separadamente às imagens de 1984, 1990 e 1994 que, devido às diferentes épocas de corte dos eucaliptos, propiciaram a visualização do mesmo local com e sem cobertura vegetal, permitindo comparar em que tipo de solo a vegetação se desenvolve com maior ou menor intensidade.

3.2.8 - ANÁLISE ESPECTRAL DE AMOSTRAS DE SOLOS E DO DOSSEL DA FLORESTA DE EUCALIPTOS.

A análise espectral de amostras de solos e do dossel da floresta de eucaliptos teve como principal objetivo comparar as respostas espectrais dos alvos (solo e vegetação) existentes dentro e fora das áreas de concentrações anômalas de HCs, no sentido de caracterizar o comportamento espectral dos materiais submetidos à ação dos HCs gasosos. Um segundo objetivo foi o de estabelecer critérios e parâmetros que forneçam suporte ao uso do sensoriamento remoto na prospecção de HCs gasosos, tanto na Bacia de São Francisco. como em outras bacias sedimentares.

A análise espectral foi feita em vários níveis: (i) em laboratório, como foi o caso das amostras de solo; (ii) a partir de uma plataforma aérea (helicóptero), no caso do levantamento das curvas espectrais do dossel da floresta de eucaliptos; e (iii), através dos valores de reflectância aparente extraídos da imagem LANDSAT TM de 12/06/1995, data esta próxima ao período em que foi realizado o levantamento aéreo sobre o dossel da floresta de eucaliptos (03/05/1995 a 04/05/1995).

3.2.8.1 - ANÁLISE ESPECTRAL DAS AMOSTRAS DE SOLOS

Com base nas curvas de valores padronizados de metano, etano e HCs mais pesados que etano, e também nas feições da cobertura vegetal extraídas das imagens de satélite, foram coletadas 6 amostras superficiais de solo em áreas localizadas dentro e fora das anomalias geoquímicas de HCs que foram enviadas ao United States Geological Survey. Reston, VA, EUA, para análise espectral.

As análises foram feitas em amostras secas através de um espectroradiometro Beckman UV-5240, equipado com esfera integradora, operando entre 400 e 2.500 nm. com uma resolução espectral variando entre 1 e 4 nm, conforme o comprimento de onda.

3.2.8.2 - ANÁLISE ESPECTRAL DO DOSSEL DA FLORESTA DE EUCALIPTOS

Conforme mencionado anteriormente, a ação dos HCs nos solos provoca uma série de alterações nas suas propriedades físico-químicas, que poderão se refletir no desenvolvimento da cobertura vegetal porventura existente nesses solos, a exemplo das verificações feitas em campo. Embora constatadas de várias formas, tais diferenças dificilmente poderiam ser caracterizadas ou estimadas em nível radiométrico apenas através das imagens LANDSAT TM, uma vez que estas não possuem resolução espacial e espectral suficiente.

Segundo Ponsoni *et al.* (1996), o processo de interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação pode ser estudado em diversos níveis. Estes incluem desde o estudo de uma folha isoladamente, até o de uma planta ou de um conjunto de plantas distribuídas sobre a superfície do terreno que compõe os chamados dosséis. Estes são, por sua vez, formados por folhas, galhos, troncos, flores e frutos, além do solo onde aquelas se desenvolvem, formando, desta maneira, o meio por onde a radiação eletromagnética incide e se propaga. O caminho percorrido pela radiação, assim como sua interação com os constituintes da vegetação, irá depender das características estruturais desta, que por sua vez estará intimamente relacionada ao seu grau de desenvolvimento. Logo, é de se esperar que associações vegetais submetidas a algum tipo de estresse tenham um comportamento espectral diferente em relação aos níveis de radiação que são absorvidos e refletidos pela vegetação sadia ao longo do espectro eletromagnético.

Goel (1988) menciona que a radiação incidente sobre um dossel é espalhada e refletida, tendo sua direção e composição espectral alteradas de forma bastante complexa. Este autor ressaltou que a reflectância espectral é a propriedade mais comumente utilizada no estudo da interação do dossel com a radiação eletromagnética, sendo esta estimada através do fator de reflectância, determinado através da relação entre a radiância espectral refletida pelo

78

dossel e a irradiância espectral. A radiância espectral refletida pelo dossel é o componente eletromagnético registrado pelos sensores em plataformas aéreas ou orbitais, possibilitando a obtenção de informações na forma de produtos digitais ou analógicos que conterão as informações espectrais do dossel analisado.

Devido às limitações de resolução espacial e espectral já mencionadas, as informações obtidas por sensores orbitais não têm sido suficientes para uma perfeita caracterização espectral do estresse da cobertura vegetal, principalmente em coberturas de porte florestal. Neste sentido, sensores aeroportados dotados de bandas mais estreitas (maior resolução espectral) podem representar uma alternativa mais eficaz na identificação dos efeitos radiométricos impostos pelo estresse da vegetação.

Neste contexto, foram planejadas missões de coletas de dados radiométricos sobre os dosséis dos plantios de eucaliptos existentes na área de estudo. O objetivo foi avaliar o potencial de discriminação das diferenças estruturais impostas à vegetação através de técnicas de sensoriamento remoto e, se possível, fazer uma comparação destes resultados com os dados LANDSAT TM.

As curvas radiométricas do dossel da floresta de eucaliptos foram obtidas pelo sistema de aquisição de dados aerotransportado (SADA), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE).

3.2.8.2.1 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS AEROTRANSPORTADO (SADA)

O Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado (SADA) é um sistema sensor passivo (capta a radiação eletromagnética proveniente de uma fonte externa) aerotransportado, que opera acoplado a um helicóptero tipo Esquilo/Helibrás, da Força Aérea Brasileira (FAB). O SADA, descrito por Steffen *et al.* (1993), é constituído por dois módulos instalados externa e internamente na aeronave. O módulo externo ("casulo") contém os equipamentos de medição, navegação e documentação, enquanto o módulo interno ("cabine") contém os equipamentos complementares para o controle e registro dos dados, como também

79

a fonte de energia elétrica para a operação do sistema (bateria selada). A Figura 3.13 apresenta os componentes do "casulo" e um esquema do módulo "cabine". A Figura 3.14 mostra um detalhe do acoplamento do SADA no helicóptero da FAB.

3.2.8.2.2 - MEDIÇÕES RADIOMÉTRICAS COM O SADA

Com base nas informações obtidas da integração dos dados geoquímicos de superfície com as imagens do LANDSAT-TM, foram selecionados e levantados 33 pontos para coleta de medidas radiométricas sobre os dosséis dos plantios de <u>Eucalyptus camaudulenses</u> e <u>Eucalyptus urophylla</u> de idades diferentes. Os pontos de medidas foram posicionados fora e dentro das áreas de influências dos HCs gasosos.

O SADA operou utilizando um radiômetro SPECTRON SE-590, coletando informações do fluxo radiante refletido no intervalo de 400 a 1.100 nanômetros, com uma resolução espectral de 8 nanômetros. Simultaneamente à aquisição dos dados, foi utilizado outro radiômetro semelhante em terra, que operou de modo sincronizado com o SADA, coletando dados radiométricos de uma placa revestida com sulfato de bário para posterior intercalibração dos radiômetros (Figura 3.15). A cada medida da placa padrão foram feitas 3 medidas (repetições) sobre os pontos selecionados para posterior determinação dos valores médios dos fatores de reflectância.

Os dados radiométricos foram coletados durante o período de 10 às 11 horas dos dias 03 e 04 de maio de 1995, através de vôos pairados sobre os pontos selecionados, mantendo-se uma altitude de aproximadamente 150 metros. Uma vez que o campo de visada instantâneo do SPECTRON é de 10[°], obteve-se um elemento de resolução espacial no terreno de aproximadamente 30 metros, compatível, portanto, com a resolução espacial das imagens do LANDSAT TM.

Os dados coletados, tanto dos pontos selecionados como da placa padrão, foram introduzidos em planilha eletrônica para a determinação dos fatores de reflectância. Estes fatores foram calculados mediante a razão entre a radiância refletida pelos pontos no terreno e a radiância da placa padrão, levando-se em consideração o horário de aquisição de cada



Figura 3.13 - Componentes do módulo "casulo" e o esquema do módulo "cabine" do SADA (Sistema de Aquisição de Dados).



Figura 3.14 - Detalhe do acoplamento do SADA - módulo "casulo" - no helicóptero da Força Aérea Brasileira.



Figura 3.15 - SPECTRON SE-590 posicionado em terra coletando dados radiométricos de uma placa padrão revestida com sulfato de bário, simultaneamente à operação de aquisição dos dados radiométricos do dossel da floresta de eucaliptos pelo SADA (helicóptero ao fundo).
espectro. Anteriormente à introdução dos dados referentes à placa padrão na planilha eletrônica, esses foram multiplicados pelos fatores de intercalibração das unidades de coletas de dados dos radiômetros, com o objetivo de uniformizar suas sensibilidades.

Para cada ponto amostrado foram elaborados gráficos referentes às médias entre 3 medidas espectrais (repetições) realizadas.

Posteriormente à obtenção das curvas espectrais, foram definidos, para os espectros de cada ponto amostrado, os valores médios correspondentes aos intervalos de 450-520 nm, 520-600 nm, 630-690 nm e 760-900, no sentido de simular respectivamente as bandas 1, 2, 3 e 4 de uma imagem LANDSAT TM.

3.2.9 - FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE OBTIDOS DA IMAGEM LANDSAT TM

Com o objetivo de traçar parâmetros de comparação entre os fatores de reflectância obtidos no levantamento com o SADA e as informações contidas na imagem do LANDSAT TM, foram extraídos os fatores de reflectância aparente da cena de 12/06/1995. Para isso, foi utilizada a imagem TM corrigida para remoção dos efeitos atmosféricos, conforme metodologia apresentada em Robinove (1982) e Epiphanio & Formaggio (1988).

Como só foi possível simular as bandas 1, 2, 3 e 4 do TM através dos dados levantados pelo SADA, calculou-se apenas os valores de reflectância aparente dessas bandas da imagem de 1995.

Os fatores de reflectância aparente foram obtidos através de amostragens realizadas por intermédio de uma pequena máscara de dimensão 3 x 3, correspondente a uma área de 9 pixels na imagem, ou seja, ao equivalente à área de 9 IFOVs. A imagem foi inspecionada visualmente no sentido de assegurar que todos os 9 pixels considerados para cada ponto continham eucaliptos. Em cada área de influência dos pontos levantados pelo SADA, foram extraídas arbitrariamente dez (10) amostras da imagem, tendo os valores de reflectância sido obtidos através do cálculo de suas médias. Esta metodologia teve por objetivo a obtenção de

83

um valor da imagem que pudesse exprimir da forma mais representativa possível o valor do fator de reflectância aparente dos pontos de amostragem. Este procedimento foi feito através da função *Cell Values Profile* no *software* ER-MAPPER, que fornece o valor de um pixel e dos seu vizinhos em uma máscara de 3 x 3 elementos.

A transformação dos DNs (níveis de cinza das bandas 1, 2, 3 e 4 do TM) em fatores de reflectância aparente foi feita através de metodologia relatada em Robinove (1982) e Epiphanio & Formaggio (1988) que consiste na aplicação de operações aritméticas às bandas da imagem, levando-se em consideração as características da elevação solar da data em que a cena foi obtida, de modo a fazer uma aproximação dos níveis de energia refletidos pelo alvo.

Em seguida são apresentados os dados necessários para a transformação dos DNs das bandas do TM em fatores de reflectância aparente, os fatores de calibração do LANDSAT TM fornecidos pela NASA (1984) – ver Tabela 3.8 - e as fórmulas de transformação que foram implementadas no ER-MAPPER.

Dados necessários para a transformação:

- Elevação solar (12/06/1995) = 31 graus $\rightarrow 31 / 57,29577951 = 0,541$ radianos
 - Zênite solar (zen) = 90 graus / 57,29577951 0,541 = 1,03 radianos

• $\pi = 3,141592654$

- Digital Number máximo (d_{máx}) = 255
- Distância Terra-Sol (em unidade astronômica aproximada) → dist = 1
 - $\cos 1,03 \text{ rd} = 0,5148$
 - DNs dos pixels da cena \rightarrow DN_(x,y)

	Lmin *	Lmáx *	Esun **
BANDA 1	A1=-0,15	A2 = 15,21	A3 = 195,7
BANDA 2	B1 =-0,28	B2 =29,68	B3 = 182,9
BANDA 3	C1=-0,12	C2 = 20,43	C3 = 155,7
BANDA 4	DI=-0,15	D2 = 20,62	D3 = 104,7

TABELA 3.8 FATORES DE CALIBRAÇÃO DO LANDSAT TM

Fonte: NASA (1984)

*Radiância mínima ou máxima com relação a sensibilidade do sensor (mW.cm⁻².ster.um⁻¹) **Irradiância solar direta média (quantidade de radiação que chega na exoatmosfera - mW.cm⁻².um⁻¹)

• Primeira transformação:

$$# II_{(x,y)} = A1 + (A2 - A1) * (DN_{(x,y)} / dmáx) - 0,15 + (15,21 - (-0,15)) * (DN_{(x,y)} / 255) # I2_{(x,y)} = B1 + (B2 - B1) * (DN_{(x,y)} / dmáx) - 0,28 + (29,68 - (-0,28)) * (DN_{(x,y)} / 255) # I3_{(x,y)} = C1 + (C2 - C1) * (DN_{(x,y)} / dmáx) - 0,12 + (20,43 - (-0,12)) * (DN_{(x,y)} / 255) # I4_{(x,y)} = D1 + (D2 - D1) * (DN_{(x,y)} / dmáx) - 0,15 + (20,62 - (-0,15)) * (DN_{(x,y)} / 255)$$

• Segunda transformação:

Reflectância aparente banda $\mathbf{1}_{(x,y)} = ((\Pi_{(x,y)} * \pi * \text{dist}) / (A3 * \cos(2en)))*255$ $((\Pi_{(x,y)} * 3,141592654 * 1) / (195,7 * 0,5148)) * 255$

Reflectância aparente banda $2_{(x,y)} = ((l2_{(x,y)} * \pi * dist) / (B3 * cos(zen)))*255$ $((l2_{(x,y)} * 3,141592654 * 1) / (182,9 * 0,5148)) * 255$

Reflectância aparente banda $3_{(x,y)} = ((13_{(x,y)} * \pi * \text{dist}) / (C3 * \cos(2en)))*255$ $((13_{(x,y)} * 3,141592654 * 1) / (155,7 * 0,5148)) * 255$

Reflectância aparente banda $4_{(x,y)} = ((l4_{(x,y)} * \pi * dist) / (D3 * cos(zen)))*255$ $((l4_{(x,y)} * 3,141592654 * 1) / (104,7 * 0,5148)) * 255$ Os Fatores de Reflectância Aparente Médios (FRAM) obtidos das banda 1, 2, 3 e 4 para os 8 pontos medidos com o SADA serão apresentados no próximo capítulo.

3.2.10 - LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DA VEGETAÇÃO, ESTIMATIVAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E AS ESTIMATIVAS DOS ÍNDICES NORMALIZADOS DE DIFERENÇA DE VEGETAÇÃO

Nesta etapa foram levantados os parâmetros biométricos da cobertura vegetal e estimados os índices de área foliar das áreas onde foram coletadas as curvas radiométricas pelo SADA. Além de fornecer informações sobre as características da floresta de eucaliptos, o levantamento dos parâmetros biométricos teve por objetivo a obtenção de dados de campo que permitissem uma avaliação do potencial da utilização de técnicas de sensoriamento remoto na identificação das diferenças estruturais da floresta de eucaliptos e nas estimativas de produção desta cultura.

A coleta dos parâmetros biométricos foi feita em conformidade com os procedimentos adotados nos trabalhos tradicionais de inventário florestal. Nesse sentido, foram calculadas as estimativas da área basal média (m²/hectare) e o volume de madeira (m³/hectare) com base no método de Strand, relatado por Lee (1995) A Figura 3.16 mostra a coleta em campo das informações necessárias para a elaboração das estimativas acima mencionadas.

Para a obtenção dos índices de área foliar, foi utilizado o instrumento *Plant Canopy Analyzer* LAI-2000, da Licor, desenvolvido para fazer determinações rápidas e não destrutivas do índice de área foliar (IAF) e de outros atributos estruturais do dossel. No caso de dosséis de porte florestal, as estimativas do índice de área foliar realizados pelo LAI-2000 apresentam uma tendência de superestimar seus valores, uma vez que os troncos e os galhos influem no balanço da radiação que trafega no interior do dossel em direção ao solo. Deste modo, os valores de IAF estimados representam na realidade a densidade da parte aérea do dossel.



Figura 3.16 - Trabalho de inventário florestal em um dos pontos levantados pelo SADA. As informações obtidas no inventário foram utilizadas na elaboração das estimativas da área basal média das árvores e do volume médio de madeira por hectare.



Figura 3.17 - LAI-2000 sendo utilizado na medição da incidência de radiação eletromagnética difusa no interior do dossel da floresta de eucaliptos.

Os procedimentos de leitura através do LAI-2000 foram baseados no manual de instruções do instrumento, que sugere a realização de medições fora e no interior do dossel, de modo a avaliar a quantidade de radiação difusa que consegue penetrar no dossel e ser captada pelo sensor do instrumento. Com base na diferença das leituras realizadas fora e dentro do dossel, são estimados os índices de área foliar que serão diretamente relacionados à quantidade de biomassa da floresta.

Para cada estimativa do índice de área foliar foram realizadas 6 repetições de medidas dentro do dossel e uma fora, cujos resultados finais foram obtidos através das respectivas médias de cada ponto. A Figura 3.17 mostra o LAI sendo utilizado nas medições da radiação eletromagnética difusa que atravessa o dossel da floresta de eucaliptos.

Nesta etapa do trabalho também foram calculados os índices normalizados de diferença de vegetação (NDVI) de cada ponto amostrado, com base nas simulações das bandas do LANDSAT TM, realizadas a partir das curvas radiométricas levantadas pelo SADA e os índices de diferença de vegetação (NDVI) calculados com base nos valores médios dos fatores de reflectância aparente.

3.2.11 – LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO – UMA ABORDAGEM ESTRUTURAL

O levantamento de informações geológicas da área de estudo foi feito com o intuito de esclarecer quais fatores geológicos do terreno poderiam estar condicionando a existência das emanações naturais de HCs. Para isto foram levantados dados geológicos de superfície e subsuperfície, gravimétricos (mapa de anomalia bouguer) e sísmicos (sísmica de reflexão) existentes na região do Remanso do Fogo. Complementando esses dados, foi realizada uma campanha de campo para levantamento de informações estruturais.

A campanha de campo foi realizada no período de 05/10/95 a 11/10/95 e a metodologia de trabalho consistiu na demarcação de alguns pontos de coletas de informações estruturais nas imediações da área de estudo. O estabelecimento destes pontos foi feito

levando-se em consideração a inexistência de afloramentos na área recoberta pelos sedimentos arenosos e pela pequena quantidade de afloramentos existentes nas suas imediações.

Após reconhecimento inicial de campo, foram definidos sete pontos de coletas de informações estruturais, onde obteve-se principalmente as informações referentes às atitudes dos planos de fraqueza do terreno (falhas e juntas) e das dobras existentes na área, através do auxílio de uma bússola Breithaupt. Com relação aos planos de fraqueza, que são as principais feições responsáveis pelas ocorrências de HCs em superfície, foram levantadas informações sobre seu espaçamento, seu grau de persistência ao longo dos afloramento (comprimento do traço) e as características dos planos de juntas (planos lisos, estriados, plumosos ou com algum tipo de preenchimento).

Em cada um dos pontos, para efeito de representatividade dos dados, foi obtido um número mínimo de 50 medidas estruturais dos planos de fraqueza existentes, propiciando a representação das famílias de juntas em estereogramas de projeção polar através do *software* STEREONET. Para cada ponto levantado foi elaborado um diagrama, onde os planos de fraqueza também foram representados por rosetas bidirecionais, inseridas nos respectivos diagramas. Estas informações foram confrontadas com as informações do mapa de anomalia bouguer e com as feições estruturais demarcadas no perfil da linha sísmica levantada pela PETROBRAS (Linha 240-060), permitindo assim esclarecer quais fatores estariam contribuindo para a existência das emanações de HCs em superfície.

3.2.12 - EFEITO DO FLUXO FORÇADO DE HIDROCARBONETOS GASOSOS EM AMOSTRAS DE SOLO E VEGETAÇÃO

Com a finalidade de complementar os resultados obtidos nas fases anteriores desta pesquisa, onde foram abordados os efeitos da presença dos HCs gasosos sobre a superfície do terreno, através da utilização de sensores aeroportados e orbitais, elaborou-se um experimento que teve por objetivo acompanhar, em condições controladas, o comportamento espectral de amostras de solo e vegetação submetidos à ação de HCs gasosos.

O experimento foi realizado junto ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), conveniado à Universidade de São Paulo (USP) - *campus* da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), localizado na cidade de Piracicaba (SP).

Na tentativa de reproduzir as condições naturais da ocorrência de gás existentes na região do Remanso do Fogo, simulou-se em laboratório (estufa) o escape de HCs gasosos em pequenos recipientes plásticos (vasos) contendo solo e vegetação.

Para a realização do experimento, utilizou-se um único tipo de solo, duas espécies vegetais (uma espécie arbórea e uma gramínea) e a reprodução de três ambientes com características diferentes em relação à presença de HCs. Foram simulados ambientes com alto fluxo forçado de gás, ambientes com baixo fluxo forçado de gás e ambientes sem a presença de gás. Estes últimos foram utilizados como parâmetros de comparação na análise dos resultados obtidos.

O solo utilizado foi coletado na região do Remanso do Fogo, em uma área afastada das áreas de anomalias geoquímicas de HCs, porém com as mesmas características físicas dos solos das regiões com a presença de HCs (Figura 3.18). A coleta foi feita durante viagem de campo que ocorreu no mês de julho de 1994, sendo o local de amostragem escolhido com base nos resultados obtidos do processamento direcionado para o realce das áreas contendo solos avermelhados (solos contendo óxidos e hidróxidos de ferro), feito sobre as imagens LANDSAT TM.

Os espécimes vegetais utilizados foram o *Eucalyptus camaudulenses* (espécie plantada na área onde se constataram alterações do solo e da vegetação) e a *Braquiária decumbens* (espécie de gramínea largamente utilizada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do país). Outros aspectos que influíram na escolha da braquiária foram o seu ciclo vegetativo condizente com o período disponível para a realização da pesquisa e o fato desta gramínea apresentar folhas com dimensões adequadas, necessárias para a obtenção de boas leituras espectro-radiométricas. A escolha do tipo de gramínea foi feita com o auxílio dos técnicos da ESALQ e do Instituto de Zootecnia de Nova Odessa - SP.

Foram simuladas três situações para cada espécie vegetal:

- solo com vegetação submetido a um fluxo forçado de HCs gasosos de 15 cm³/minuto (aproximadamente 100 bolhas de gás/minuto);
- solo com vegetação submetido a um fluxo forçado de HCs gasosos de 7,5 cm³/minuto (aproximadamente 50 bolhas de gás/minuto);
- solo com vegetação sem a presença de gás;

Em cada uma das situações descritas acima foram realizados 10 recipientes (5 recipientes com eucaliptos e 5 com gramíneas), sendo sua montagem realizada sobre mesas de ferro dentro de uma estufa. As repetições foram programadas de forma a possibilitar avaliações estatísticas, dando maior representatividade aos resultados.

Dentro da estufa, o ambiente foi isolado por intermédio da construção de uma estrutura de madeira e plástico, impedindo assim que os HCs gasosos afetassem de alguma forma outras experiências em andamento no local (Figura 3.19). Foi instalado também um sistema de exaustão para ajudar na eliminação dos gases presentes no ambiente. Em duas das mesas, onde foram montados os vasos que receberam os solos e a vegetação, foram instalados sistemas de injeção de gás.

Os vasos foram adaptados de modo a receber nas suas partes basais os HCs gasosos que, com o auxílio de pequeno pratos plásticos, devidamente perfurados e assentados sobre uma superfície de vidro, possibilitaram a disseminação do gás pelo solo sobrejacente (Figuras 3.20 e 3.21). Ainda dentro dos recipientes, estes pratos plásticos (dispositivos auxiliares na dispersão do gás) foram isolados do solo através da colocação de uma pequena quantidade de brita (Figura 3.22), recoberta por pequenos pedaços de sombrite (Figura 3.23), evitando-se assim possíveis entupimentos do sistema de dispersão de gás.

O gás utilizado foi o Gás Natural para Veículo (GNV), fornecido pela Gerência de Vendas de Gás Sul da PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. e acondicionados em 2 feixes de 4 cilindros. O GNV foi escolhido por apresentar composição química parecida com a composição dos gases naturais emanantes na Bacia do São Francisco (metano - 88%, etano - 8%, propano - 2%, HCs mais pesados que butano - 0,5%, nitrogênio - 1% e dióxido de carbono - 0,5%).



Figura 3.18 - Coleta de solo para o experimento na região do Remanso do Fogo.



Figura 3.19 - Aspecto interno da casa de vegetação do IPEF mostrando as três mesas onde foram colocados os recipientes e o isolamento feito de madeira e lona plástica transparente.



Figura 3.20 - Detalhe do recipiente e do prato plástico perfurado com os parafusos de latão vazados.



Figura 3.21 - Detalhe do sistema de injeção de gás mostrando o modo como o gás, através do tubo plástico, foi levado para dentro dos recipientes. Observe as perfurações feitas no prato plástico.



Figura 3.22 - Detalhe da montagem do prato perfurado no fundo do recipiente e o seu recobrimento com pedras britadas.



Figura 3.23 - Aspecto interno do recipiente mostrando o sombrite que foi colocado sobre as pedras britadas, evitando o contato do solo com o prato plástico perfurado.

Os cilindros contendo o gás utilizado no experimento foram colocados do lado de fora da casa de vegetação (Figura 3.24) e eram recarregados, sempre que necessário, em um posto da BR Distribuidora, localizado na cidade de São Paulo.

Um sistema de tubos, mangueiras de PVC e pequenos registros de gás foi utilizado para levar o gás dos cilindros até o interior dos vasos (Figuras 3.25 e 3.26). O controle da vazão do gás injetado nos vasos foi feito através da contagem do número de bolhas por minuto dentro de um *erlenmayer* com água (Figura 3.27). Este *erlenmayer* foi colocado na parte final do sistema de injeção, interceptando o gás antes dele atingir o vaso. O número de bolhas contados dentro dos *erlenmayers* foi controlado por pequenos registros de gás de cozinha existentes ao longo das mangueiras e instalados antes dos *erlenmayers* (Figura 3.28).

O sistema de injeção de gás, constituído por tubos e mangueiras, passou por vários testes que indicaram quais seriam as melhores condições de pressão dentro do sistema. de modo a não danificar os tubos, as mangueiras e as conexões instaladas, assim como não comprometer a segurança das pessoas que trabalhavam no local. Para isto, foram utilizadas duas válvulas de alívio de pressão. A primeira foi colocada imediatamente na saída do feixe de cilindros de gás (Figura 3.29), de modo a reduzir a pressão do fluido e não danificar a mangueira de alta pressão, utilizada para levar o HC até as mesas. Com os cilindros cheios atingem-se pressões de até 220 kgf/cm² que, por intermédio da primeira válvula, era reduzida para 2 kgf/cm². A segunda válvula (Figura 3.30) reduziu ainda mais esta pressão e fez com que os gases fossem injetados nos sistemas de tubos e mangueiras das mesas com uma pressão final de aproximadamente 1,5 kgf/cm², propiciando desta forma uma injeção contínua e sem variações dos índices de vazões ao longo do experimento.

O experimento teve seu início em setembro de 1994 e foram gastos quatro meses de com os procedimentos de montagem e os testes.

3.2.12.1 - ETAPAS DO EXPERIMENTO

O experimento foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, os solos contidos nos recipientes passaram por um período de preparação para receber os espécimes vegetais. Nesta



Figura 3.24 - Vista externa da casa de vegetação do IPEF mostrando os dois feixes de cilindros de gás natural veicular (GNV) e o exaustor utilizado para eliminar os gases do ambiente interno.



Figura 3.25 - Vista da mesa montada com os recipientes e o sistema de tubos e mangueiras, juntamente com os *erlenmayers* contendo água para a contagem do número de bolhas por minuto. No chão, à esquerda, a segunda válvula de alívio de pressão e o mecanismo de distribuição de GNV para as duas mesas.



Figura 3.26 - Vista de uma das mesas mostrando detalhes da arquitetura do experimento.



Figura 3.27 - Detalhe de um dos erlenmayers do experimento mostrando internamente o borbulhamento de gás.



Figura 3.28 - Detalhe do registro de gás colocado ao longo da mangueira de baixa pressão que irá controlar a quantidade de gás injetado no recipiente.



Figura 3.29 - Válvula de alívio de pressão acoplada no feixe de cilindros de gás mostrando também a mangueira de alta pressão que leva o gás para uma segunda válvula de alívio de pressão, colocada antes do sistema de tubos das mesas.



Figura 3.30 - Detalhe da válvula de alívio de pressão com os manômetros que controlam a pressão do gás que chega pela mangueira de alta pressão (mangueira preta) e o que controla a pressão do gás que é injetado no sistema de tubos e mangueiras das mesas do experimento (mangueira de PVC transada com fios de nylon).

fase, tanto as sementes de eucaliptos como as de gramíneas só foram semeadas nos solos dos vasos após 46 dias do início da injeção dos gases. Este procedimento foi adotado tentando reproduzir as condições de campo, que tiveram sua vegetação plantada sobre solos que já se encontravam sob o efeito dos HCs gasosos. Tal procedimento, no entanto, não produziu bons resultados, possibilitando apenas a obtenção de informações referentes aos índices de germinação das sementes plantadas. Após 3 meses de injeção contínua de gás, e percebendo-se que as mudas não atingiriam um tamanho adequado para obtenção dos dados radiométricos, tomou-se a decisão de interromper o experimento e reiniciar uma segunda etapa, onde foram adotados critérios diferentes dos usados na primeira etapa.

Na segunda etapa, novos solos foram colocados nos vasos e preparados segundo os critérios de adubação adotados pelo Departamento de Ciências Florestais da ESALQ. A semeadura das sementes foi feita em local separado, sendo repicadas nos recipientes após 30 dias. Quatro meses após a semeadura, quando a vegetação plantada nos vasos atingiu o tamanho ideal para a realização das medidas radiométricas, reiniciou-se a injeção do gás e conseqüentemente a coleta dos dados.

Ao longo do experimento, além do acompanhamento espectral, foi feito um acompanhamento das mudanças químicas e físicas dos solos e da vegetação, as quais foram qualificadas e quantificadas através de análises químicas, físicas e visuais de amostras.

Durante o experimento foram realizadas as seguintes análises sobre os solos e sobre a vegetação:

• Medidas do potencial redox dos solos;

• Difratometria e espectrometria de raio-X de amostras de solo → identificação de mudanças mineralógicas do solo;

 Análise química dos solos → Análise da fertilidade do solo (quantificação de macro e micro-nutrientes);

100

Análise química da vegetação → Análise da concentração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), zinco (Zn) e ferro (Fe) nas folhas, ramos, caules e raízes. No caso das gramíneas, esta análise só foi realizada na sua porção aérea (não foi feita nenhuma análise sobre as raízes das gramíneas);

Análise física da vegetação → Obtenção do peso seco;

Análise microbiológica das amostras de solo;

• Espectro-radiometria de amostras da vegetação e do solo \rightarrow A análise espectroradiométrica possibilitou a obtenção de curvas de comportamento espectral da vegetação e do solo e foram obtidas através do espectro-radiômetro SPECTRON SE-590, cedido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);

A Tabela 3.9 mostra as várias etapas do experimento, com a descrição das atividades realizadas e suas respectivas datas.

O próximo capítulo será dedicado à apresentação dos resultados obtidos nas várias etapas deste trabalho.

ЕТАРА	ATIVIDADE	DATA
	Início da montagem do experimento	setembro de 1994
1ª Etapa	Início da injeção de gás	13/01/95
	Semeadura das sementes	06/03/95
	Cálculo da porcentagem de germinação das sementes	02/05/95
	Corte da injeção de gás	03/05/95
• .	Coleta de amostras para análise de fertilidade dos solos	04/05/95
	Semeadura das sementes em local separado dos recipientes	17/07/95
	Preparação dos recipientes	18/07/95
	Repicagem das mudas nos recipientes	17/08/95
	Início da injeção do gás	21/11/95
	1º período do levantamento das curvas espectrais da vegetação	22/11/95
	1ª bateria de medidas do potencial REDOX do solo	30/11/95
	2º período do levantamento das curvas espectrais da vegetação	02/12/95
2ª Etapa	3º período do levantamento das curvas espectrais da vegetação	14/12/95
	4º período do levantamento das curvas espectrais da vegetação	05/01/96
	5º período do levantamento das curvas espectrais da vegetação	18/01/96
	Corte da vegetação para análise química e do peso seco	18/01/96
	2ª bateria de medidas do potencial REDOX do solo	15/02/96
	Coleta de amostra para análise de fertilidade do solo	18/03/96
	3ª bateria de medidas do potencial REDOX do solo	02/04/96
	Corte da injeção do gás – Coleta de solo para análise microbiológica – Leitura do potencial REDOX	02/05/96
	Coleta de solo para levantamento das curvas espectrais	02/05/96

Tabela 3.9QUADRO DE ATIVIDADES REALIZADAS DURANTE O EXPERIMENTO

CAPÍTULO 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo será dedicado à apresentação dos resultados obtidos nas etapas de integração dos dados de geoquímica de superfície com as imagens LANDSAT TM, processamento das imagens LANDSAT TM, levantamento das curvas espectrais do solo e do dossel da floresta de eucaliptos (análise espectral), levantamento de parâmetros biométricos da floresta, aquisição de dados estruturais de campo e coleta de informações obtidas na simulação (em laboratório) do fluxo forçado de HCs gasosos em amostras de solo e vegetação.

4.1 – INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT TM COM OS DADOS DE GEOQUÍMICA DE SUPERFÍCIE

A Figura 4.1 mostra a integração das curvas de iso-concentração padronizada de metano, etano e HCs mais pesados que etano com a imagem LANDSAT TM (composição colorida falsa-cor), propiciando uma melhor visualização dos locais portadores de concentrações anômalas de HCs gasosos.

4.2 – INTEGRAÇÃO DOS MAPAS DE HIDROCARBONETOS GASOSOS ATRAVÉS DE COMPOSIÇÃO COLORIDA RGB

A Figura 4.2 mostra as imagens em níveis de cinza geradas a partir das curvas de isoconcentração padronizada de metano, etano e HCs mais pesados que etano, elaboradas segundo procedimentos comentados no capítulo anterior. As área com níveis de cinza claros indicam locais com altas concentrações dos respectivos gases.

Para a elaboração da composição colorida, foram atribuídas as cores vermelho (R) para o metano, verde (G) para o etano e azul (B) para os gases mais pesados que etano, compondo, deste modo, a composição colorida metano (R), etano (G) e HCs mais pesados que etano (B), apresentada na Figura 4.3. Técnicas de manipulação de histogramas foram



Figura 4.1 - Curvas de iso-concentrações padronizadas de metano, etano e de HCs mais pesados que etano integradas à imagem LANDSAT TM (composição colorida falsa-cor 5R/4G/3B).



Figura 4.2 - Imagens em níveis de cinza geradas a partir das curvas de iso-concentrações padronizadas de metano, etano e de HCs mais pesados que etano. Os níveis de cinza claros indicam locais com altas concentrações dos respectivos gases.



Figura 4.3 - Composição colorida RGB formada pelas imagens de metano (Red), etano (Green) e hidrocarbonetos mais pesados que etano (Blue).

empregadas no sentido de realçar as informações de interesse, tornando o dado mais apresentável e fácil de ser interpretado. Pelo processo de composição em cores no espaço RGB, torna-se possível avaliar conjuntamente as áreas de maiores concentrações dos três tipos de gases.

Desse modo, as áreas com cores amarelas na Figura 4.3 indicam a presença de concentrações simultâneas e elevadas de metano e etano; áreas de coloração ciano, concentrações elevadas de etano e gases mais pesados que etano; áreas de coloração magenta, altas concentrações de metano e gases mais pesados que etano. As áreas esbranquiçadas indicam locais com concentrações elevadas dos três gases.

4.3 – APLICAÇÃO DO ÍNDICE NORMALIZADO DE DIFERENÇA DE VEGETAÇÃO (NDVI) À ÁREA DE PLANTIO DE EUCALIPTOS

A aplicação do NDVI foi aplicado à imagem LANDSAT TM de 24/05/1994 e realçou feições de formato circular correspondentes a áreas desprovidas de cobertura vegetal no interior da floresta de eucaliptos. Devido ao formato e dimensões, estas feições são associadas a pontos de intensa emanação de HCs gasosos. A Figura 4.4 mostra a imagem NDVI e as feições circulares resultante deste processamento. As verificações de campo confirmaram a existência destas clareiras, onde não se desenvolve nenhum tipo de vegetação e os solos apresentam colorações cinza-esbranquiçadas, conforme ilustrado na Figura 4.5.

4.4 – APLICAÇÃO DE ANÁLISE POR PRINCIPAIS COMPONENTES (APC) NO REALCE DE FEIÇÕES ASSOCIADAS ÀS EMANAÇÕES DE HIDROCARBONETOS

A aplicação da APC sobre as imagens LANDSAT TM foi realizada segundo os procedimentos citados no capítulo anterior. Este tipo de processamento teve por objetivo enfatizar feições em superfície que pudessem estar associadas às áreas portadoras de anomalias espectrais de solo e da vegetação, induzidas pela presença dos HCs gasosos. Para isto foi necessário uma avaliação preliminar das matrizes de auto-vetores para o conjunto das bandas utilizadas no realce das feições de interesse.



Figura 4.4 - Índice Normalizado de Diferença de Vegetação (NDVI) aplicado à imagem LANDSAT TM de 24/05/1994. Além das áreas enfatizadas com diferentes índices de vegetação, o NDVI também realçou inúmeras clareiras de formato circular dentro da floresta de eucaliptos. Estas clareiras são associadas à pontos de emanações de HCs gasosos.



Ì

ł

Figura 4.5 - Aspecto de uma das clareiras de formato circular existente dentro da floresta de eucaliptos, evidenciada através da aplicação do Índice Normalizado de Diferença de Vegetação (NDVI) à imagem LANDSAT TM de 25/05/1994.

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram as matrizes de auto-vetores para os conjuntos TM1, TM3, TM4 e TM5 das imagens de 1990 e 1994, que foram utilizados na seleção das componentes contendo informações sobre os óxidos/hidróxidos de ferro. A Tabela 4.3 mostra a matriz de auto-vetores para o conjunto TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 da imagem de 1984, utilizada na seleção da componente contendo as informações da vegetação.

A análise das matrizes de auto-vetores indicou a PC4 das bandas TM1, TM3, TM4 e TM5 como a portadora da informação espectral relativa aos óxidos/hidróxidos de ferro para o grupo das bandas 1, 3, 4 e 5. Da mesma forma, a PC2 das 6 bandas do espectro refletido foi indicada como a portadora da informação da vegetação. No caso da vegetação. a imagem correspondente à PC2, que realça a vegetação, foi multiplicada por -1 para proporcionar a visualização dos alvos de interesse em tons (DNs) claros.

Para a aplicação da APC foram selecionadas duas áreas posicionadas em cotas diferentes e detentoras de concentrações anômalas de HCs, segundo informações contidas na composição colorida RGB dos gases de petróleo (ver Figura 4.3). A primeira situa-se próximo à junção dos rios São Francisco e Paracatu, em cotas aproximadas de 470 a 475 metros, enquanto que a segunda encontra-se em local mais elevado topograficamente, com cotas variando de 505 a 510 metros.

As imagens da Figura 4.6 mostram os produtos da APC aplicada em duas regiões distintas situadas dentro da área de plantio de eucaliptos. Nestas imagens, as áreas claras apontadas pelas setas indicam a presença do alvo de interesse, realçado pelo processamento utilizado, indicando o íntima correlação entre as áreas de maior densidade de cobertura vegetal e as áreas portadoras de solos contendo óxidos e hidróxidos de ferro.

4.5 – ANÁLISE ESPECTRAL DE AMOSTRAS DE SOLOS

Tendo como referência as curvas de iso-concentração padronizada de HCs gasosos, foram coletadas 6 amostras superficiais de solo em áreas posicionadas dentro e fora das anomalias geoquímicas. A Figura 4.7 mostra a banda 5 do LANDSAT TM de 12/06/1995 integrada às curvas de iso-concentrações de HCs mais pesados que etano e os pontos de coleta de solos que foram analisados espectralmente.

Tabela 4.1				
MATRIZ DE AUTO-VETORES				
CONJUNTO TM1, TM3, TM4 E TM5 - CENA DE 01/06/1990				

	COEFICIENTES DE AUTO-VETORES (%)				
	PC1	PC2	PC3	PC4	
TM1	11,67	-14,53	-23,88	-58,20	
TM3	19,82	-25,49	-34,54	38,03	
TM4	10,66	59,18	-21,01	2,08	
TM5	57,82	0,79	20,55	-1,66	

Tabela 4.2MATRIZ DE AUTO-VETORESCONJUNTO TM1, TM3, TM4 E TM5 - CENA DE 24/05/1994

	COEFICIENTES DE AUTO-VETORES (%)				
	PC1	PC2	РС3	PC4	
TM1	11,49	-8,21	-22,55	-63,43	
ТМЗ	20,86	-21,19	-41,51	33,54	
TM4	5,91	68,42	-16,16	2,80	
TM5	61,72	2,16	19,76	0,21	

Tabela 4.3MATRIZ DE AUTO-VETORESCONJUNTO TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 E TM7 - CENA DE 13/06/1984

	COEFICIENTES DE AUTO-VETORES (%)					
	PC1	PC2	РС3	PC4	PC5	PC6
TM1	8,60	5,27	-18,17	-18,65	-47,39	-15,77
TM2	7,27	2,81	-17,46	-8,53	1,63	56,34
ТМЗ	15,42	8,95	-27,70	-7,95	35,59	-23,47
TM4	5,27	-70,54	-7,26	4,58	-0,90	-1,76
TM5	42,21	-1,51	21,64	-15,06	2,48	1,82
TM7	21,20	10,90	-7,75	45,20	-11,98	0,82



Figura 4.6 - Texto desta figura no verso da página anterior.

As análises das curvas obtidas (Figura 4.8) mostram a diferença entre as amostras de solo coletadas em locais com anomalias geoquímicas de HCs (pontos 1, 3 e 5) daquelas coletadas fora das áreas de influência dos HCs (pontos 2, 4 e 6). As amostras referentes aos locais onde há anomalia geoquímica apresentam fatores relativos de reflectância geralmente mais elevados, associados à ausência de feições significativas de absorção na porção do espectro visível. Este fato ocorre devido à existência de teores mais baixos de óxidos e/ou hidróxidos de ferro nesses locais, o que confere uma coloração acinzentada para estas amostras, em comparação com colorações mais avermelhadas para as restantes. Estas curvas também não apresentam as bandas de absorção características do íon Fe³⁺, localizadas na região de 650 nanômetros e na faixa de 850 a 920 nanômetros).

Observando as porções mais distantes do espectro infravermelho (intervalo de 1.300 a 2.500 nanômetros), constatam-se, tanto nas amostras coletadas dentro das anomalias geoquímicas de HCs como nas coletadas fora, feições típicas de absorção localizadas nas regiões de 1.400, 1.900 e 2.200 nanômetros, aqui interpretadas como sendo relativas a um argilo-mineral do grupo da caolinita ou a uma caolinita de baixa cristalinidade, pelo fato das curvas não apresentarem as feições duplas muito bem definidas em 2.170 e 2.200 nanômetros.

4.6 – ANÁLISE ESPECTRAL DO DOSSEL DA FLORESTA DE EUCALIPTOS ATRAVÉS DO SADA - CURVAS DOS FATORES DE REFLECTÂNCIA E AS SIMULAÇÕES DAS BANDAS DO LANDSAT TM

Com base na análise dos 33 espectros coletados em campo no período de 03 a 04/05/1995, foram selecionados 8 pontos como sendo os mais representativos das áreas localizadas dentro e fora das anomalias geoquímicas de HCs, segundo os critérios de idade, espécie e concentração de gases (Figura 4.9). A Tabela 4.4 mostra os pontos selecionados, a espécie de eucaliptos existente em cada um deles, a época de plantio e os respectivos índices de iso-concentrações de gases (metano - C1, etano - C2, HCs mais pesados que etano - C2+ e HCs total) extraídos das informações da geoquímica de superfície.

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram as curvas espectrais dos dosséis da floresta de eucaliptos que foram levantadas pelo SADA, dentro e fora das áreas de anomalia geoquímica de HCs gasosos.



Figura 4.7 - Imagem da banda 5 do LANDSAT TM de 12/06/1995 com a localização dos pontos de coleta de solos para análise espectral, juntamente com as curvas de iso-concentrações padronizadas de Hcs mais pesados que etano.



Figura 4.8 - Curvas espectrais de amostras de solos coletados dentro (curvas vermelhas) e fora (curvas azuis) das áreas de anomalias geoquímicas de HCs gasosos.



Figura 4.9 - Imagem LANDSAT-TM de 12/06/1995 (Banda 3 transformada em fator de reflectância) mostrando os pontos de coleta de informações radiométricas pelo SADA. Os pontos em vermelho correspondem às amostras representativas das diferentes épocas do plantio dos eucaliptos, tendo sido posicionadas dentro e fora das regiões portadoras de concentrações anômalas de hidrocarbonetos gasosos.





Figura 4.10 - Curvas espectrais do dossel da floresta de eucaliptos levantadas pelo SADA, dentro (curvas vermelhas) e fora (curvas azuis) das áreas de anomalias geoquímica de HCs gasosos para os pontos 1, 3, 4 e 6.




Figura 4.11 - Curvas espectrais do dossel da floresta de eucaliptos levantadas pelo SADA, dentro (curvas vermelhas) e fora (curvas azuis) das áreas de anomalias geoquímica de HCs gasosos para os pontos 20, 22, 23 e 27.

Com base nas curvas espectrais levantadas pelo SADA, constata-se que, de uma forma geral, os níveis dos fatores de reflectância referentes aos dosséis da floresta de eucaliptos, posicionados dentro das áreas de anomalias geoquímica de HCs, mostram-se mais elevados na porção visível do espectro eletromagnético, quando comparados com os dosséis posicionados fora das áreas de anomalias de gases. O inverso ocorre nas porções de comprimentos de onda relacionados ao infra-vermelho próximo, onde observa-se níveis menores dos fatores de reflectância para os dosséis submetidos à presença dos HCs gasosos.

PONTO	ESPÉCIE	ÉPOCA DO PLANTIO	C1 (ppm)	C2 (ppm)	C2+ (ppm)	HCs TOTAL (ppm)
1	Eucalyptus urophylla	1990	1,34	0,28	0,64	2,26
3*	Eucalyptus urophylla	1990	2,72	0,28	1,85	4,85
4	Eucalyptus camaudulenses	1992	2,03	1,19	0,64	3,86
6*	Eucalyptus camaudulenses	1992	4,10	2,10	1,85	8,05
20	Eucalyptus camaudulenses	1990	3,41	0,28	0,64	4,33
22*	Eucalyptus camaudulenses	1990	2,72	0,28	3,05	6,05
23*	Eucalyptus camaudulenses	1991	2,03	1,19	1,85	5,07
27	Eucalyptus camaudulenses	1991	1,34	0,28	0,64	2,26

TABELA 4.4 PONTOS SELECIONADOS PARA ANÁLISE ESPECTRAL

* Pontos localizados dentro de áreas de elevada concentração relativa de HCs gasosos.

As diferenças constatadas indicam uma diminuição na quantidade totais de pigmentos para as folhas dos dosséis posicionados dentro das anomalias de HCs, assim como uma diferenciação na densidade da cobertura vegetal conforme ilustrado nas Figuras 4.12 e 4.13 que mostram, em vista aérea, os aspectos dos dosséis da floresta de eucaliptos de onde foram coletadas as informações radiométricas pelo SADA, respectivamente para o ponto 4 (localizado fora da área de influência das anomalias geoquímicas de HCs gasosos) e para o ponto 6 (localizado dentro de uma área portadora de anomalia geoquímica de HCs gasosos). Tais diferenças encontram-se intimamente associadas às concentrações de HCs totais conforme mostra a tabela acima (Tabela 4.4).



Figura 4.12 - Vista aérea do dossel da floresta de eucaliptos (ponto 4) onde foram obtidos os dados radiométricos pelo SADA. Este ponto localiza-se fora das áreas de influência das anomalias geoquímicas de hidrocarbonetos gasosos.



Figura 4.13 - Vista aérea do dossel da floresta de eucaliptos (ponto 6) onde foram obtidos os dados radiométricos pelo SADA. Este ponto localiza-se dentro de uma área portadora de anomalia geoquímica de hidrocarbonetos. Comparando-se o dossel deste ponto com o dossel do ponto 4 (Figura 4.12), pode-se notar a baixa densidade de cobertura vegetal, a diferença de coloração do conjunto foliar e um maior percentual em área de solo exposto.

Conforme relatado na metodologia do trabalho, após a obtenção das curvas pelo SADA, foram definidos os valores médios correspondentes aos intervalos de 450-520 nm, 520-600 nm, 630-690 nm e 760-900 nm, com o objetivo de simular as bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor TM existente no LANDSAT 5.

As Figuras 4.14 e 4.15 ilustram essas simulações que, a exemplo das curvas espectrais, também são apresentadas comparando-se dois pontos posicionados fora (barras azuis) e dentro das anomalias geoquímicas de HCs gasosos.

Da mesma forma que os resultados obtidos nas curvas espectrais, os fatores de reflectância, integrados de acordo com o *range* das respectivas bandas do TM, mostram níveis de reflectância relativamente menores, na porção do visível - simulação das bandas 1. 2 e 3 -, para os dosséis posicionados fora das áreas de anomalia. No caso da simulação da banda 4, os fatores de reflectância são mais elevados para os dosséis sem influência dos gases. Tanto para a porção visível do espectro, como para a porção do infra-vermelho, os dados levantados através da simulação do TM enfatizam mais ainda que os espécimes posicionados fora das anomalias de gás apresentam uma maior quantidade de pigmentos nas suas folhas, mostrando também variações na densidade da cobertura vegetal.

4.7 – OS FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE MÉDIOS (FRAM) OBTIDOS DA IMAGEM LANDSAT TM

A partir dos procedimentos metodológicos relatados no capítulo anterior foram obtidos os fatores de reflectância aparente (FRA) da imagem LANDSAT TM, obtida em 12/06/1995.

A Figura 4.16 mostra a banda 4 da imagem LANDSAT TM transformada para níveis de reflectância aparente com o posicionamento das repetições dos pontos de amostragens feitos em cada ponto levantado pelo SADA.

Os fatores de reflectância aparente médios (FRAMs) obtidos das banda 1, 2, 3 e 4 para os 8 pontos medidos com o SADA, são apresentados respectivamente nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, assim como, os FRAMs das 10 repetições feitas em cada ponto de amostragem e os desvios-padrão.

SIMULAÇÃO DAS BANDAS DO LANDSAT-TM

SADA

Eucalyptus urofila - 5 ANOS - Pontos 1 (azul - sem HCs) e 3 (vermelho - com HCs)

SADA

SIMULAÇÃO DAS BANDAS DO LANDSAT-TM

Figura 4.14 – Simulação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM a partir das curvas de comportamento espectral do dossel da floresta de eucaliptos levantadas pelo SADA para os pontos 1, 3, 4 e 6.

SADA SIMULAÇÃO DAS BANDAS DO LANDSAT-TM



Eucalyptus camaudulenses - 5 ANOS - Pontos 20 (azul - sem HCs) e 22 (vermelho - com HCs)



Figura 4.15 - Simulação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM a partir das curvas de comportamento espectral do dossel da floresta de eucaliptos levantadas pelo SADA para os pontos 20, 22, 23 e 27.



Figura 4.16 - Detalhes da imagem LANDSAT-TM (Banda 4) transformada para níveis de reflectância aparente com o posicionamento das repetições das amostragens feitas em cada ponto levantado pelo SADA.

TABELA 4.5 FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE

BANDA 1

	FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE											
PONTOS	MÉDIA VALORES MÉDIOS DAS AMOSTRAS (10 MEDIDAS) DOS PONTOS (MATRIZ 3 x 3)									- · ·	DESVIO PADRÃO	
1	18,05	18,92	18,92	18,92	17,48	17,96	17,48	17,48	18,44	17,48	17,48	0,67
3*	18,90	18,44	17,96	18,44	19,40	19,88	18,92	19,88	18,92	18,44	18,92	0,63
4	19,92	20,84	19,88	19,40	20,36	19,88	19,40	19,88	19,88	20,36	19,40	0,47
6*	19,87	18,92	21,31	20,84	18,92	19,88	21,31	19,88	21,31	18,92	21,79	1,13
20	19,40	20,36	19,40	19,88	19,40	18,92	19,40	19,40	18,44	19,40	19,40	0,50
22*	19,35	18,92	18,92	19,40	19,88	18,92	20,84	19,88	18,92	18,92	18,92	0,65
23*	19,44	19,88	19,40	19,40	18,12	19,40	19,88	19,40	19,88	18,92	19,40	0,35
27	19,11	18,92	18,44	18,92	19,40	19,40	19,40	18,92	18,92	19,88	18,92	0,40

* Pontos localizados dentro de áreas de elevada concentração relativa de HCs gasosos.

TABELA 4.6

FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE

BANDA 2

FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE												
PONTOS	MÉDIA DOS PONTOS		VALORES MÉDIOS DAS AMOSTRAS (10 MEDIDAS) (MATRIZ 3 x 3)									DESVIO PADRÃO
	15,11	13,61	15,61	15,61	14,61	15,61	15,61	14,61	15,61	14,61	15,61	0,70
3*	16,41	15,61	16,61	15,61	16,61	16,61	16,61	16,61	16,61	17,61	15,61	0,63
4	17,30	17,61	17,61	16,61	16,61	17,61	16,61	17,61	17,61	18,60	16,61	0,67
6*	17,50	17,61	18,60	16,61	16,61	16,61	18,6	17,61	18,60	17,61	16,61	0,87
20	15,71	14,61	16,61	14,61	15,61	15,61	16,61	15,61	15,61	16,61	.15,61	0,73
22*	16,61	16,61	16,61	16,61	16,61	16,61	16,61	17,61	15,61	16,61	16,61	0,47
23*	16,21	15,61	16,61	15,61	16,61	16,61	15,61	16,61	15,61	16,61	16,61	0,51
27	15,61	16,61	15,61	15,61	15,61	14,61	15,61	15,61	15,61	15,61	15,61	0,48

* Pontos localizados dentro de áreas de elevada concentração relativa de HCs gasosos.

TABELA 4.7 FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE BANDA 3

FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE												
PONTOS	MÉDIA DOS PONTOS		VALORES MÉDIOS DAS AMOSTRAS (10 MEDIDAS) (MATRIZ 3 x 3)									DESVIO PADRÃO
1	11,60	10,88	12,49	10,07	11,68	12,49	10,88	11,68	11,68	13,29	10,88	0,96
3*	14,58	14,10	14,90	14,10	14,10	14,10	14,90	16,52	14,10	14,90	14,10	0,77
4	16,43	16,52	15,71	16,52	16,52	16,52	16,52	16,52	16,52	15,71	17,32	0,45
6*	18,14	18,31	18,93	18,93	16,52	17,32	18,93	18,13	18,93	18,13	17,32	0,84
20	13,69	14,10	14,10	13,29	13,29	14,10	13,29	13,29	14,10	13,29	14,10	0,42
22*	16,59	17,32	16,52	15,71	15,71	16,52	16,52	17,32	14,10	17,32	18,93	1,28
23*	15,79	15,71	16,52	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	0,25
27	14,17	13,29	14,10	13,29	14,90	14,10	14,90	14,10	14,10	14,90	14,10	0,59

* Pontos localizados dentro de áreas de elevada concentração relativa de HCs gasosos.

TABELA 4.8

FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE

BANDA 4

FATORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE												
PONTOS	MÉDIA DOS PONTOS		VALORES MÉDIOS DAS AMOSTRAS (10 MEDIDAS) (MATRIZ 3 x 3)									DESVIO PADRÃO
1	71,12	72,82	70,40	72,82	69,19	69,19	74,03	69,19	70,40	72,82	70,40	1,82
3*	67,37	66,77	65,56	66,77	69,19	65,56	66,77	66,77	69,19	67,98	69,19	1,42
4	58,42	54,66	58,30	57,09	58,30	59,51	57,09	59,51	59,51	60,72	59,51	1,75
6*	53,45	54,66	52,24	53,45	52,24	52,24	52,24	54,66	52,24	54,66	55,87	1,39
20	52,24	52,24	53,45	51,03	61,93	49,82	51,03	53,45	49,82	49,82	49,82	3,69
22*	45,70	43,77	43,77	47,40	48,61	43,77	43,77	44,98	48,61	43,77	48,61	2,29
23*	49,45	49,82	47,40	49,82	49,82	49,82	49,82	49,82	49,82	49,82	48,61	0,81
27	51,99	52,24	51,03	53,45	52,24	52,24	51,03	53,45	51,03	52,24	.51,03	0,95

* Pontos localizados dentro de áreas de elevada concentração relativa de HCs gasosos.

Os gráficos das Figuras 4.17 e 4.18 mostram as bandas do LANDSAT TM com seus respectivos valores médios de reflectância aparente, obtidos para os pontos amostrados fora e dentro das áreas de anomalias geoquímicas de HCs gasosos. Nestes gráficos, as barras de cor azul correspondem aos valores de FRAMs dos pontos posicionados fora das áreas de influência dos HCs gasosos e as barras vermelhas, dentro.

Comparando-se os resultados das simulações das bandas do LANDSAT TM com os valores de FRAMs referentes aos pontos selecionados das imagens transformadas para FRA, observa-se que as informações geradas são relativamente parecidas, mostrando apenas diferenças nos níveis dos fatores de reflectância das bandas 1 e 2 do TM que decrescem em direção a banda 3, enquanto ocorre o inverso para os dados levantados pelo SADA. De uma forma geral, o comportamento do dossel da floresta de eucalipto permanece mostrando níveis mais deprimidos para as áreas localizadas fora da influência dos HCs, na região do espectro correspondente a faixa do visível (bandas 1, 2 e 3), enquanto na porção do infra-vermelho próximo (banda 4), os níveis relativos são relativos mais elevados. Para as bandas do LANDSAT TM, os FRAMs mostram diferenças muito pequenas para as 1 e 2.

4.8 – LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DA VEGETAÇÃO, ESTIMATIVAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) E ESTIMATIVAS DOS ÍNDICES NORMALIZADOS DE DIFERENÇA DE VEGETAÇÃO (NDVI)

O levantamento dos parâmetros biométricos da vegetação, assim como as estimativas dos índices de área foliar (IAF) e dos índices normalizados de diferença de vegetação (NDVI) foram levantados com o intuito de se obter dados de campo que permitissem uma avaliação do potencial de utilização de técnicas de sensoriamento remoto na identificação das diferenças estruturais da floresta, além de fornecer informações adicionais que comprovam as previsões feitas nas outras etapas do trabalho.

Seguindo metodologia relatada anteriormente foram feitas as estimativas das áreas basais médias e do volumes médios de madeira para os pontos levantados pelo SADA e estudados através das imagens LANDSAT TM transformadas em fatores de reflectância aparente, cujos valores são apresentados na tabela 4.9. Os resultados mostram uma relação



Eucalyptus urofila - 5 anos - Pontos 1 (azul - sem HCs) e 3 (vermelho - com HCs)



FATOR DE REFLECTÂNCIA LANDSAT - TM

Eucalyptus camaudulenses - 3 ANOS - Pontos 4 (azul - sem HCs) e 6 (vermelho - com HCs)

Figura 4.17 – Representação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM na forma de FRAM para os pontos 1, 3, 4 e 5. As barras azuis correspondem aos pontos posicionados fora das anomalias geoquímicas de HCs gasosos e as barras vermelhas, aos pontos posicionados dentro.



Eucalyptus camaudulenses - 5 ANOS - Pontos 20 (azul - sem HCs) e 22 (vermelho - com HCs)



FATOR DE REFLECTÂNCIA LANDSAT - TM

Eucalyptus camaudulenses - 4 ANOS - Pontos 23 (vermelho - com HCs) e 27 (azul - sem HCs)

Figura 4.18 - Representação das bandas 1, 2, 3 e 4 do LANDSAT TM na forma de FRAM para os pontos 20, 22, 23 e 27. As barras azuis correspondem aos pontos posicionados fora das anomalias geoquímicas de HCs gasosos e as barras vermelhas, aos pontos posicionados dentro.

direta destas estimativas de área e volume com as concentrações de HCs gasosos para estes pontos.

Os NDVIs calculados através dos dados do SADA e das imagens transformadas, corroboram os resultados obtidos no levantamento dos parâmetros biométricos da vegetação, acontecendo o mesmo com os IAFs. Estes últimos mostram mudanças nas previsões esperadas apenas nos pontos 1 e 3, cujo valor da área portadora de alta concentração de HCs gasosos (ponto 3) é maior do que o da outra área (ponto 1).

Tabela 4.9								
PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DA VEGETAÇÃO								
NDVI (SADA) - NDVI (FRAM)								
ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)								

PONTOS	ÁREA BASAL MÉDIA/HECTA RE (m ² /há)	VOLUME MÉDIO/HECTARE (m³/ha)	NDVI (SADA)	NDVI (FRAM)	IAF
	8,18	53,10	0,797	0,719	1,19
3*	5,15	45,68	0,706.	0,644	1,36
4	5,01	28,39	0,630	0,559	0,88
6*	2,40	12,69	0,576	0,493	0,84
20	7,68	95,83	0,599	0,584	1,44
22*	5,24	45,51	0,575	0,467	1,39
23*	4,81	36,61	0,549	0,516	1,03
27	6,06	47,19	0,607	0,571	1,09

* Pontos localizados dentro de áreas de elevada concentração relativa de HCs gasosos.

4.9 – LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO – UMA ABORDAGEM ESTRUTURAL

Este item será dedicado à descrição das informações geológicas levantadas na região do Remanso do Fogo, que tiveram por objetivo esclarecer quais são os fatores geológicos que condicionam as emanações naturais de HCs gasosos em superfície.

A seguir serão apresentados os dados geológicos, geofísicos (gravimetria e sísmica de reflexão) e do levantamento dos elementos estruturais obtidos neste trabalho.

4.9.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS

A região do Remanso do Fogo encontra-se inserida na porção central da Bacia do São Francisco. Ali afloram sedimentos de idade Vendiana, relacionados ao Grupo Bambuí (Dardene, 1978). Este grupo é, por sua vez, formado pelo Subgrupo Paraopeba (siltitos e folhelhos alternados com calcários e dolomitos, correspondentes às formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade) e pela Formação Três Marias (arcósios e siltitos intercalados).

A espessura sedimentar do Grupo Bambuí, levantada no local através de secções sísmicas, é de aproximadamente 1800 metros. Embora de idade Proterozóica, as rochas apresentam um grau muito baixo de metamorfismo, mostrando vários horizontes com presença de hidrocarbonetos (HCs) gasosos, conforme constatado no poço 1-RF-1-MG, perfurado pela PETROBRAS nas imediações da área de estudo.

Na área de estudo, os sedimentos do Grupo Bambuí são cobertos por coberturas detríticas, configurando delgadas camadas de sedimentos arenosos de idades quaternária e terciária, conforme o mapa geológico da área (Figura 4.19). Formadas por depósitos fluviais arenosos, com lentes de silte, argila e cascalho (depósitos aluvionares), as coberturas quaternárias ocorrem ao longo dos rios São Francisco e Paracatu. Já os sedimentos do Terciário-Quaternário são formados por coberturas elúvio-coluvionares de composição areno-argilosa, mostrando conglomerados nos níveis basais.

Estruturalmente, os estratos do Grupo Bambuí apresentam-se ligeiramente dobrados, com mergulhos suaves, configurando sinclinais e anticlinais de grande amplitude. Na porção sul da área observam-se eixos de dobras com direção N25E, mostrando suave caimento para SW.

Lineamentos de relevo e drenagem, interpretados em imagens de satélite, mostram zonas de juntas nas direções N60-70E e N20-30E, posicionando-se sobre as áreas de

Mapa Geológico da Área de Estudo



Figura 4.19 - Mapa geológico da área de estudo.

ocorrência das emanações de gás da região do Remanso do Fogo. Adicionalmente, as direções N50-60W e NS também são evidenciadas, formando outras famílias de juntas. A direção N20-30E mostra relação de paralelismo com as direções de falhas localizadas em domínios geológicos adjacentes da Faixa Araçuaí, que nestas latitudes sofrem um leve arqueamento para NE. Juntas E-W ocorrem na porção noroeste da área, condicionando a rede de drenagem existente sobre a cobertura arenosa.

4.9.2 - MAPA DE ANOMALIA BOUGUER

Com o propósito de obter informações adicionais sobre o arcabouço estrutural da área onde se observa a maior ocorrência de gases termoquímicos da Bacia do São Francisco e auxiliar na elaboração de um programa sísmico sobre a área do Remanso do Fogo, a PETROBRAS elaborou um mapa de anomalia Bouguer (Figura 4.20) sobre uma área de 16.500 km², compreendida entre as coordenadas 16° e 17° de latitude sul e 44° 30' e 46° 30' de longitude oeste. Este mapa foi confeccionado em 1991, a partir da aquisição de 1.047 pontos gravimétricos, distribuídos ao longo de uma malha aproximada de 5 quilômetros de espaçamento. Para isso, foi utilizado um gravímetro LaCoste & Rombergt, modelo G. Imagens de satélites LANDSAT TM foram utilizadas para auxiliar os caminhamentos de campo e o exato posicionamento dos pontos.

Marinho *et al.* (1991) relatam de forma detalhada as etapas de elaboração do mapa de anomalia Bouguer, o qual revelou a existência de um alto gravimétrico alongado na direção N-NE sobre a zona de ocorrência das emanações de gás da região do Remanso do Fogo. Este alto gravimétrico, segundo interpretação do autor - que fez parte da equipe que elaborou tal levantamento - parece indicar a existência de um alto estrutural do embasamento em profundidade, sendo sua configuração semelhante aos altos estruturais aflorantes do embasamento nas serras da Água Fria e do Cabral (Grupo Espinhaço), localizadas à sudeste da cidade de Pirapora.

4.9.3 - SÍSMICA DE REFLEXÃO

Ainda com o objetivo de melhor avaliar o comportamento geológico dos estratos do Grupo Bambuí e do seu embasamento, a PETROBRAS, baseada no posicionamento



das ocorrências naturais de gases termoquímicos, nos dados obtidos da gravimetria e nas informações geológicas de superfície, realizou em 1992 um levantamento sísmico na região do Remanso do Fogo, estendendo-se estas linhas até as zonas mais deformadas a oeste da Faixa Brasília.

Como resultado dos trabalhos de interpretação destas linhas, Braun *et al.* (1993) apresentaram a interpretação de algumas secções sísmicas desse levantamento inicial, mostrando as principais feições geológicas da região.

Embora o embasamento do Grupo Bambuí tivesse sido inicialmente posicionado a uma profundidade aproximada de 2.000 metros (Braun *et al., op. cit.*), abaixo da profundidade final do poço 1-RF-1-MG que atingiu 1.847 metros, interpretações recentes indicam que esse embasamento encontra-se mais precisamente a 1.775 metros, em discordância que separa os calcilutitos da Formação Sete Lagoas dos conglomerados e diamictitos da Formação Jequitaí. A discordância angular existente à profundidade de 2.000 metros constitui, na realidade, o limite entre os sedimentos do Grupo Macaúbas e as seqüências psamíticas do Grupo Espinhaço, que se mostram bastante estruturadas, com blocos descontínuos e prováveis intercalações de rochas básicas encaixados em falhas normais, reativadas por tectonismo compressivo.

A Figura 4.21 mostra um esquema de parte da interpretação feita por Braun (1997) para o embasamento do Grupo Bambuí, na extremidade sudeste da linha 240-060 que corta a área de estudo, passando pelo poço 1-RF-1-MG.

Nesta mesma linha (240-060), foi feita uma nova interpretação complementar baseada nas feições sísmicas observadas no perfil sísmico referente à área de estudo, enfocando desta vez apenas a faixa corresponde aos sedimentos do Supergrupo São Francisco e parte do seu embasamento subjacente. Os resultados obtidos mostram que existem descontinuidades nos refletores sísmicos que são interpretados como associações de falhas inversas e falhas normais (Figura 4.22). Muitas destas falhas interpretadas atravessam toda a seqüência Bambuí, conectando a superfície do terreno com o embasamento subjacente.



Figura 4.21 - Interpretação realizada sobre a linha sísmica 240-060 que corta a área de estudo (desenho modificado e adaptado de Braun, 1997).





Projetando estas falhas para a superfície do terreno, observa-se que tais estruturas apresentam relacionamentos com as feições fisiográficas da região, condicionando trechos do Rio Paracatu e parte das drenagens secundárias. Da mesma forma, as evidências sísmicas de falhas mostram o que os limites sudeste e noroeste dos sedimentos Terciário-quaternário que formam as coberturas arenosas da área de estudo, também encontram-se condicionados por estas estruturas.

A simples visualização dos traços marcados no perfil sísmico impossibilitam qualquer interprete de tecer comentários sobre as prováveis direções destas estruturas. No entanto, informações de outras linhas sísmicas adjacentes (não apresentadas neste trabalho), associadas ao mapa de anomalia *bouguer*, aos aspectos fisiográficos e aos dados geológicos regionais, permitem afirmar que as estruturas demarcadas à sudeste do Rio Paracatu possuem direções variando de N20-30E a N60-70E. Já as duas últimas falhas marcadas na extremidade NW do perfil sísmico, apresentam direção E-W. Esta afirmação é feita com base nas direções de alinhamentos das drenagens, existentes à noroeste do Rio Paracatu.

As evidências sísmicas de falhas indicam que estes planos funcionam como caminhos preferenciais de migração dos gases (provavelmente originados em seqüências sedimentares mais antigas) em direção à superfície. As falhas posicionadas abaixo dos poços 1-RF-1-MG e Jacarezinho, abaixo do Rio Paracatu e abaixo da área de cobertura arenosa, explicam claramente como os HCs gasosos atingem a superfície.

4.9.4 - LEVANTAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CAMPO

O levantamento dos elementos estruturais de campo foi feito com o objetivo de complementar os dados obtidos anteriormente, de modo a possibilitar avaliações mais detalhadas sobre as ocorrências de HCs em superfície.

Após um reconhecimento generalizado nas imediações da área de trabalho, onde se constatou a pequena quantidade de afloramentos, e levando-se em consideração a inexistência de afloramentos na região recoberta pelos sedimentos arenosos, foram definidos 7 pontos de coleta de informações estruturais (estações de trabalho) espalhados nos arredores da área de estudo.

A Figura 4.23 mostra a localização dos pontos de coleta de informações estruturais de campo. Dos 7 pontos definidos, 5 encontram-se entre os rios São Francisco e Paracatu, estando 1 a leste do Rio São Francisco (10 km a oeste do lugarejo chamado Ponto Chic) e o outro a oeste do Rio Paracatu (próximo à cidade de Santa Fé de Minas).

De uma forma geral, foram levantadas principalmente as informações referentes às atitudes dos planos de fraqueza do terreno (falhas e juntas) e das dobras existentes na área. Com relação aos planos de fraqueza, que são as principais feições responsáveis pelas ocorrências dos hidrocarbonetos em superfície, foram levantadas informações sobre seu espaçamento, seu grau de persistência ao longo dos afloramentos (comprimento do traço) e as características dos planos de juntas (planos lisos, estriados, plumosos ou com algum tipo de preenchimento).

Estruturalmente falando, a região do Remanso do Fogo caracteriza-se por ser bastante "tranqüila", não apresentando grandes feições estruturais. Com relação ao tipo de estruturas em superfície, apenas foi constatada a existência de planos de juntas, algumas falhas e pequenas dobras de dimensões centimétricas. No caso dos planos de fraqueza, as falhas são de difícil constatação, sendo observados apenas raros e pequenos falhamentos, predominando de forma generalizada planos de juntas em várias direções.

Em cada um dos pontos, para efeito de representatividade dos dados, foi obtido um número mínimo de 50 medidas estruturais dos respectivos planos de juntas existentes, propiciando a elaboração e a representação das famílias de juntas em estereogramas de projeção polar.

A seguir serão apresentadas as principais evidências estruturais observadas em cada ponto de coleta de informações estruturais.

PONTO 1 - Afloramento de calcários escuros relacionados ao topo da Formação Lagoa do Jacaré (nível estratigráfico mais baixo no contexto da área de estudo). O afloramento mostra blocos de calcários com camadas horizontalizadas, apresentando localmente pequenas dobras assimétricas com eixo N20E e vergência para NW (Figura 4.24). Ainda neste ponto, ocorrem siltitos calcíferos laminados relacionados à Formação Serra da



Pontos de Coleta de Informações Estruturais de Campo

Figura 4.23 - Mapa de localização dos pontos de coleta de informações estruturais de campo.

Saudade (na realidade, os sedimentos relacionados à Formação Serra da Saudade que ocorrem nesta região correspondem, estratigraficamente, à transição entre a Formação Lagoa do Jacaré e a Formação Três Marias). Neste local, o pacote de siltito encontra-se bastante intemperizado, mostrando 3 famílias de juntas, uma principal (N40-50W) e duas secundárias (N20E e N70E). Pequenos dobramentos são observados no pacote de siltito, com eixo N25E e caimento para sudoeste. Intercaladas nos siltitos, ocorrem finas camadas de arenito arcosiano, relacionadas com os sedimentos da base da Formação Três Maria. Nesta estação, as juntas são pouco espaçadas e mostram traços retilíneos. As juntas N40-50W são mais persistentes e penetrativas, interceptando as outras direções.

PONTO 2 - Localizado a 1 quilômetro do ponto anterior, este afloramento é representado por um pacote de arenito fino, bastante calcífero, posicionado sobre os siltitos laminados do ponto anterior (estes sedimentos relacionam-se com a base da Formação Três Marias). Neste local, os sedimentos encontram-se intensamente fraturados na direção N50-60E (Figura 4.25), existindo no local uma provável zona de falha. Os traços destas juntas são bastante persistentes e pouco espaçados (~10 cm), apresentando traços ligeiramente curvos.

PONTO 3 - Lajedos de siltitos laminados na margem do Rio São Francisco (rancho de pesca da Fazenda das Aroeiras), mostrando juntas na direção **N40-60W** (Figura 4.26). Estas juntas são bastante persistentes, truncando as outras famílias (**N70E**, **N20E** e **N-S**). O espaçamento das juntas principais varia de 30 cm a 2 metros, com traços contínuos e planos localizados mostrando estruturas plumosas (juntas de tração).

PONTO 4 - Afloramento de siltitos alterados de coloração cinza-esverdeada e bastante laminados, nas imediações da Fazenda Jacobina. Neste local, as juntas de direção **N60W** são dominantes, em relação às fraturas de direção **N10-20E**, apresentando traços longos, contínuos e com espaçamento decimétrico.

PONTO 5 - Afloramento de siltito laminado de cor cinza-esverdeado bastante fraturado, localizado entre a Fazenda Jacobina e o local onde foi perfurado o poço 1-RF-1-MG. O afloramento é constituído por uma drenagem que encontra-se encaixada ao longo das juntas existentes. Neste local, as juntas predominantes são as de direção N40-60W que ocorrem cortando as juntas de direção N20-30E (Figura 4.27). Nos planos das juntas



Figura 4.24 - PONTO 1. Afloramento de calcário mostrando pequenas dobras suavemente assimétricas com eixo N20E e vergência para NW.



Figura 4.25 - PONTO 2. Camadas de arenitos finos intensamente fraturados, indicando uma zona de falha de direção N50-60E.



Figura 4.26 - PONTO 3. Lajedos de siltitos laminados na margem do rio São Francisco, mostrando juntas de direção N55W.



Figura 4.27 - PONTO 5. Afloramento de siltito laminado de coloração cinza-esverdeado, mostrando planos de juntas nas direções N40-60W (à direita) e N20-30E (à esquerda).

principais ocorrem evidências da existência de prováveis planos com estruturas plumosas, indicando a existência de prováveis juntas de tração.

PONTO 6 - Afloramento de siltitos laminados localizado a 10 quilômetros a leste de Ponto Chic. O afloramento encontra-se bastante fraturado, evidenciando as direções de juntas **N70W e N-S.** Localmente, ocorrem evidências de planos de juntas com estrutura plumosas na direção **N70W**.

PONTO 7 - Afloramento sob a ponte do Córrego Mocambo, nas proximidades de Santa Fé de Minas, mostrando pacote de siltito alterado, bastante fraturado. Neste afloramento observa-se nível interestratal, apresentando pequenos *duplex* (feições de empurrão) indicando esforços oriundos de **NE** para **SW**. Estas estruturas mostram pequenos planos de falha com direção **N60W** mergulhando para **NE** (Figura 4.28). Neste ponto, ocorrem planos de juntas nas direções **N70-80W** e **N30E**, sendo esta última direção portadora de planos com estrutura plumosa (Figura 4.29).

Para cada ponto de coleta de informações estruturais foi elaborado um estereograma de projeção polar, representando os planos existentes. A Figura 4.30 mostra os estereogramas representativos dos pontos de 1 a 6, posicionados na porção leste-sudeste de área de estudo. Os pontos de 1 a 6 foram agrupados por estarem contidos dentro de um mesmo contexto estrutural, diferentemente do ponto 7, que encontra-se enquadrado num contexto diferente. A Figura 4.31 mostra os estereogramas obtidos para os pontos de 1 a 6 e o estereograma do ponto 7, separadamente.

Os elementos estruturais obtidos para os 6 primeiros pontos mostram coerência com as informações regionais conhecidas e previstas para a área de estudo, tendo em vista as direções dos esforços tectônicos que atuaram na região e que foram abordados no capítulo 2.

Com relação as constatações feitas no ponto 7, surge aí uma surpresa, pois os elementos estruturais analisados indicam a existência de esforços compressivos com vergência para sudoeste, impondo uma componente que pode explicar o porque da não existência de acumulações comerciais de hidrocarbonetos nesta região. Comentários mais detalhados sobre este assunto serão feitos no próximo capítulo.



)

Figura 4.28 - PONTO 7. Afloramento de siltito alterado com nível interestratal apresentando pequenas estruturas *duplex* com planos de falha na direção N70W, mergulhando 25 graus para NE.



Figura 4.29 - PONTO 7. Siltito alterado mostrando plano de junta com estrutura plumosa na direção N30E.



Figura 4.30 – Estereogramas de projeção polar associado a rosetas bidirecionais mostrando as atitudes dos planos levantados nos pontos de 1 a 6.



Figura 4.31 - Estereogramas de projeção polar associado a rosetas bidirecionais mostrando as atitudes dos planos levantados na poção leste-sudeste da área (pontos de 1 a 6) e no ponto 7.



Principais Elementos Estruturais da Área Estudada

Figura 4.32 - Mapa mostrando os principais elementos estruturais levantados na área do Remanso do Fogo.

O mapa da Figura 4.32 apresenta uma síntese das principais feições identificadas durante o levantamento dos elementos estruturais de campo na região do Remanso do Fogo.

4.10 – RESULTADOS DO EXPERIMENTO DO FLUXO FORÇADO DE HIDROCARBONETOS GASOSOS EM AMOSTRAS DE SOLO E VEGETAÇÃO

Este item será dedicado a apresentação dos resultados obtido nas várias etapas do experimento do fluxo forçado de HCs gasosos em amostras de solo e vegetação.

4.10.1 - EFEITO DOS HIDROCARBONETOS GASOSOS SOBRE O CRESCIMENTO DAS PLANTAS

Após 16 semanas do início da injeção dos gases nos recipientes, interrompeu-se o fluxo de HCs depois de constatado que as espécies plantadas não mostravam sinais de crescimento adequado. No entanto, mesmo com a interrupção, foi possível obter informações sobre o percentual de germinação das sementes plantadas, tendo os resultados servido para elucidar alguns dos aspectos observados nos trabalhos de campo, como o não desenvolvimento dos eucaliptos em algumas das áreas portadoras de elevadas concentrações de HCs gasosos.

Durante a primeira fase do experimento, realizou-se um acompanhamento do desenvolvimento das sementes dos eucaliptos e das gramíneas semeadas nos recipientes, proporcionando o cálculo dos respectivos percentuais de germinação. Os cálculos dos percentuais foram feitos multiplicando-se o número de sementes germinadas por quatro, uma vez que foram semeadas 25 sementes em cada recipiente, justamente para facilitar este tipo de operação.

Ao longo desta fase foram realizados 3 levantamentos dos percentuais de germinação das sementes. Os resultados médios de germinação para cada situação de vazão forçada de gás podem ser vistos na Tabela 4.10.

Observando os índices da Tabela 4.10, pode-se dizer que o percentual de germinação decresce com o aumento da vazão forçada de HCs gasosos dentro dos recipientes, ocorrendo

também uma diminuição do percentual de germinação das plantas com o aumento do tempo de exposição ao gás. Esta diminuição foi causada em parte pela mortalidade de algumas mudas que chegaram a brotar, mas não resistiram à exposição dos gases.

DIAS ÁPÓS A SEMEADURA (06/03/95)	TRATAMENTO	TIPO DE VEGETAÇÃO	GERMINAÇÃO (%)		
	15 cm ³ /min.	Eucaliptos	16,8		
		Braquiária	0		
22 DIAS	7,5 cm ³ /min.	Eucaliptos	36,8		
(28/03/95)		Braquiária	0,8		
	Sem fluxo de gás	Eucaliptos	44		
		Braquiária	3,2		
	15 cm ³ /min.	Eucaliptos	15,2		
		Braquiária	0		
42 DIAS	7,5 cm ³ /min.	Eucaliptos	32,8		
(17/04/95)		Braquiária	0,8		
	Sem fluxo de gás	Eucaliptos	32;8		
		Braquiária	3,2		
	15 cm ³ /min.	Eucaliptos	11,2		
		Braquiária	0		
57 DIAS	7,5 cm ³ /min.	Eucaliptos	26,4		
(02/05/95)		Braquiária	0,8		
	Sem fluxo de gás	Eucaliptos	30,4		
		Braquiária	3,2		

Tabela 4.10PERCENTUAIS DE GERMINAÇÃO DAS SEMENTES PLANTADAS

As Figuras 4.33, 4.34, 4.35 e 4.36 mostram, comparativamente, as mudas de eucaliptos e gramíneas com 3 semanas de idade, semeadas nos vasos com e sem a presença de gás de petróleo. Estas ilustrações mostram a baixa taxa de germinação das mudas dos recipientes submetidos à vazão forçada de HCs, assim como os nítidos sinais de deficiência nutricional impressos nas extremidades das folhas (Figura 4.33).

4.10.2 - EFEITO DOS HIDROCARBONETOS GASOSOS NO POTENCIAL REDOX DO SOLO

A grande maioria das reações químicas e bioquímicas que ocorrem no solo realiza-se através de processos de oxidação e redução, ou seja, através da transferência de elétrons de



Figura 4.33 - Mudas de eucaliptos com 3 semanas, brotadas em recipiente submetido ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos (vazão de 15 centímetros cúbicos por minuto). Observe a baixa taxa de germinação e a presença de algumas mudas mortas no centro do recipiente. O ressecamento nas extremidades de algumas folhas indica os primei ros sinais de deficiência nutricional.



Figura 4.34 - Mudas de eucaliptos com 3 semanas, brotadas em recipiente não exposto ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos. Comparando-se com a ilustração da Figura 4.33, estas mudas apresentam um percentual de germinação mais elevado e não observa-se sinais de deficiência nutricional nas folhas.



Figura 4.35 - Recipientes submetidos ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos (vazão de 15 cm³/min), 3 semanas após o plantio das sementes de braquiária. Observe que não ocorreu germinação em nenhum dos recipientes (percentual de germinação igual a zero).



Figura 4.36 - Mudas de braquiária 3 semanas após terem sido semeadas nos recipientes sem a presença de fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos.

um elemento ou íon para outro elemento ou íon (Kiehl, 1982), sendo essas reações controladas principalmente pelo grau de disponibilidade de elétrons no meio, também chamado de **potencial redox (Eh)**.

Numa reação de oxi-redução, o agente oxidante funciona como receptor de elétrons que é reduzido neste processo, enquanto o agente redutor doa elétrons e é oxidado. Exemplo disto é o Fe^{2+} (ion ferroso) que, como doador de elétrons, é tido como agente redutor transformando-se em Fe^{3+} (ion férrico). Já o ion Fe^{3+} quando recebe elétrons é tido como agente oxidante, transformando-se em Fe^{2+} . Os ions que participam de um reação ou de uma semi-reação, como é mais corretamente definido, constituem um **par redox.**

A facilidade com que um determinado elemento ou íon doa ou recebe elétrons de outro elemento ou íon é dada pelo seu potencial de elétron, que é referido ao par redox (íons que participam de uma reação). Para se determinar o potencial redox, basta imaginar um pedaço de metal servindo de eletrodo sendo mergulhado em uma solução oxidante, o que fará com que o metal perca elétrons e, conseqüentemente, adquira uma carga positiva. No entanto, se a solução for redutora, o metal ganhará elétrons, ficando com uma carga negativa. Em qualquer um dos dois casos, pode-se dizer que o metal ou eletrodo adquiriu um potencial que se refere ao poder da solução em oxidar ou reduzir. Segundo Oliveira *et al.* (1993), o termo potencial de uma meia-pilha (o potencial adquirido por um dos eletrodos forma uma meia-pilha), isto é, o potencial de uma determinada meia-pilha medido contra a meia-pilha padrão de hidrogênio, é designado $E_{\rm H}$ ou **potencial redox**. O potencial redox constitui, então, uma medida de intensidade, expressando, essencialmente, a disponibilidade, ao invés da quantidade, de elétrons envolvidos nos sistemas redox que, por sua vez, são constituídos por um conjunto de pares redox (o solo, por exemplo, constitui um sistema redox).

Apesar da simplicidade das determinações do potencial redox em solos, os resultados geralmente diferem dos potenciais estimados em condições de equilíbrio por ocorrerem nos solos, simultaneamente, vários pares redox.

Ainda segundo Oliveira *et al.* (1993), quando o solo em condições oxidadas é alagado, o E_H decresce durante os primeiros dias até atingir um valor mínimo, aumentando em seguida
até um valor máximo e, a partir daí, tende a se estabilizar em valores característicos do solo, algumas semanas após o alagamento. Condições parecidas devem ocorrer nos solos submetidos ao fluxo forçado de HCs, pois de certa forma, a presença dos HCs no solo torna o ambiente anaeróbico. As alterações de E_H , no entanto, irão depender da temperatura, quantidade e natureza da matéria orgânica e dos teores de receptores de elétrons presentes no sistema. Em solos alagados, potenciais de +200 a -400 mV refletem condições de redução, enquanto potenciais de +300 a +800 mV indicam condições de oxidação. Durante o alagamento de solos ácidos, ocorre a formação de espécies que foram reduzidas, ocorrendo o consumo de prótons e, conseqüentemente, o aumento do pH.

Operacionalmente, a determinação do potencial redox é considerada tão simples quanto a obtenção dos parâmetros de pH, sendo necessária apenas a inserção no solo de um eletrodo de platina combinado a um eletrodo de calomelano. A Figura 4.37 ilustra os equipamentos utilizados na obtenção do potencial redox dos solos do experimento. Utilizouse, para isto, um voltímetro ligado a um eletrodo de platina e a outro de calomelano que foram imersos e fixados nos solos dos recipientes com o auxílio de um dispositivo de borracha perfurado e que, juntamente com as medidas de pH dos recipientes obtidas por intermédio de um phmetro de campo, forneceram o potencial redox dos solos expostos ao fluxo forçado de HCs gasosos e dos solos não expostos a esse fluxo.

Durante a segunda etapa do experimento, foram obtidas informações sobre o potencial redox em três períodos distintos, com duração respectivamente de 9, 86 e 133 dias após o início da injeção do gás nos recipientes. O objetivo foi avaliar a evolução do comportamento do potencial redox nos solos submetidos à presença de HCs gasosos.

A Tabela 4.11 mostra os resultados médios do potencial redox de 10 medidas realizadas em cada tratamento, obtidos através da fórmula extraída de Dutra & Nunes (1987):

$E_H = E (mV) + 250 mV + 60 mV X (pH - 7,0)$

onde:

 E_H = potencial redox

E = valor da leitura do voltímetro após um período de 10 minutos

pH = valor da leitura do phmetro após um período de 10 minutos



Figura 4.37 - Aparelhos utilizados na obtenção dos valores do potencial *redox* dos solos dos recipientes. À esquerda, o voltímetro no qual foi acoplado os eletrodos de calomelano e de platina, fixados no solo com o auxílio de um dispositivo de borracha. À direita, o phmetro de onde se obteve as leituras de pH do solo.

	PERÍODO DE APLICAÇÃO DO GÁS							
	9 I	DIAS	86 I	86 DIAS		DIAS ·		
TRATAMENTO	pH	$E_H(\mathrm{mV})$	pН	E_H (mV)	pН	$E_H (\mathrm{mV})$		
15 cm ³ /min	3,68	328,14	3,80	269,12	3.64	369,14		
7,5 cm ³ /min	4,04	325,58	3,66	282,14	3,54	397,36		
sem gás	4,04	327,88	3,56	304,26	3,26	419,20		

Tabela 4.11POTENCIAL REDOX DOS SOLOS DO EXPERIMENTO

Os valores apresentados na Tabela 4.11 mostram que ocorreram variações do potencial redox (E_H) ao longo do experimento. Os valores obtidos no início do experimento são muito parecidos, mostrando pequenas diferenças (valores E_H entre 325,58 e 328,14 mV). Já os resultados obtidos com 86 dias, mostram que houve uma queda generalizada dos valores de E_H para as três situações, tendo sido constatada uma queda mais acentuada para a situação de maior vazão forçada de HCs gasosos (de 328,14 mV para 269,12 mV). Ocorreu, portanto, disponibilidade de elétrons nestes recipientes, diminuição da diminuindo uma conseqüentemente a reatividade entre os elementos do solo. As últimas medidas, feitas após 133 dias do início da injeção de gás, mostraram que houve um aumento do potencial redox para as três situações, sendo que a variação foi menos acentuada para a situação de maior vazão de gás (de 269,12 mV para 369,14 mV) e mais acentuada para a situação sem gás (de 304,26 mV para 419,20 mV). Comparativamente, mesmo tendo seus valores aumentados para todas as situações, o potencial redox dos recipientes com gás permaneceu menor, continuando com disponibilidades menores de elétrons no ambiente.

4.10.3 - EFEITO DOS HIDROCARBONETOS GASOSOS NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS

4.10.3.1 - MINERALOGIA TOTAL E MINERALOGIA DE ARGILAS

Na tentativa de identificar possíveis mudanças na composição mineralógica dos solos utilizados no experimento logo após o término da injeção de gases da segunda etapa, foram coletadas 15 amostras, sendo 5 amostras nos recipientes submetidos à vazão de 15 cm³/min de

HCs gasosos, 5 submetidas ao fluxo de 7,5 cm³/min de HCs e 5 dos recipientes sem o fluxo de gás.

Estas amostras foram enviadas ao Setor de Geologia de Reservatórios (SEGRES) da Divisão de Geologia e Engenharia de Reservatórios (DIGER) do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES), onde foram analisadas por difração de raios-X para obtenção da mineralogia total e da mineralogia de argilas e cujos resultados foram publicados por Anjos *et al.* (1997).

Das 15 amostras coletadas, 3 (uma de cada tipo de tratamento) foram submetidas à análise da mineralogia total por difração de raios-X, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 MINERALOGIA TOTAL

TRATAMENTO	AMOSTRA	ARGILA	QUARTZO
15 cm ³ /min	RECIPIENTE 3	5%	95%
7,5 cm ³ /min	RECIPIENTE 13	5%	95%
SEM GÁS	RECIPIENTE 24	5%	95%

Os resultados obtidos mostram que não ocorreu nenhum tipo de mudança perceptível na composição mineralógica dos solos durante a realização do experimento que pudesse ser atribuída à presença dos HCs gasosos. Há nas 3 amostras analisadas uma predominância de quartzo (95%) e pequenas quantidades de argilo-minerais (5%).

Da mesma forma, tentando identificar possíveis alterações na composição dos argilominerais, as 15 amostras coletadas foram submetidas à análise da mineralogia de argilas e, mais uma vez, não foi constatada nenhuma alteração no tipo de argila. A caulinita foi o mineral encontrado nas 15 amostras submetidas à análise da fração argila, ocorrendo em todas elas traços de clorita.

4.10.3.2 - COLORAÇÃO DOS SOLOS

Com relação à coloração dos solos, foram levantadas as cores dos solos secos no início da injeção do gás (21/11/95) e no final da injeção do gás (15/01/96), através do auxílio de uma Carta Munsell de Cores. A Tabela 4.13 ilustra as cores dos solos para as datas mencionadas acima nas três situações simuladas.

Tabela 4.13	
COLORAÇÃO DO	SOLO

TRATAMENTO	INICIO DA INJEÇÃO DO GÁS (21/11/95)	FINAL DA INJEÇAO DO GAS (15/01/96)	
15 cm ³ /min	7.5YR4/3 (MARROM)	I0YR4/3 (MARROM)	
7,5 cm ³ /min	7.5YR4/3 (MARROM)	10YR4/4 (MARROM-AMARELADO-ESCURO)	
SEM GÁS	7.5YR4/3 (MARROM)	10YR4/4 (MARROM-AMARELADO-ESCURO)	

Indices extraídos da Carta Munsell de Cores

Os índices da Tabela 4.13 mostram que ocorreu uma variação de cores durante a realização da segunda fase do experimento. No início da injeção do gás, obteve-se a cor identificada pelo índice 7.5YR4/3 (cor marrom) de forma generalizada para todos os recipientes, passando para cores de índices 10YR4/3 (cor marrom), nos vasos com fluxo de 15 cm³/min, e 10YR4/4 (cor marrom-amarelado escuro), para os com fluxo de 7,5 cm³/min e para os vasos sem o fluxo de HCs. Cabe ressaltar que ambas as leituras sobre a Carta Munsell de Cores foram feitas com o solo relativamente úmido.

4.10.4 - EFEITO DOS HIDROCARBONETOS GASOSOS NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS

Nesta etapa da pesquisa, foram coletadas amostras de solo da porção superficial e basal dos recipientes para análise da fertilidade dos solos. As amostras da porção basal foram coletadas através de um pequeno amostrador de vaso, confeccionado especialmente para esta finalidade. Coletaram-se as amostras 16 semanas após o início da injeção do gás e as análises foram realizadas no laboratório do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ. Nestas análises, foram determinados em laboratório o pH dos solos, a quantidade de matéria

orgânica, a quantidade de elementos trocáveis (K, Ca, Mg, H + Al, Al), a soma das bases (Ca+Mg+K), a saturação de bases, capacidade de troca catiônica dos solos e saturação em alumina, avaliadas segundo metodologia descrita por Raij *et al.* (1987). A Tabela 7.6 mostra os valores médios da análise de fertilidade dos solos obtidos para as porções superficiais e basais dos recipientes, assim como as médias de cada uma das três mesas. Foram coletadas amostras apenas para os recipientes onde foram semeados eucaliptos.

Tabela 4.14						
ANÁLISE	DE	FERTILIDADE	DOS	SOLOS		

VAZÃO	AMOSTRA	pН	М.О.	K	Са	Mg	H+Al	Al	SB	Т	SB/T	SAT
cm ³ /min		CaCl2 - 0,01 M	g/cm ³			mmc	$l_c/dm^3 = 1$	00cm ³		L	%	: 11
15	Superficie	3,04	9,10	0,62	1,00	1,40	97,40	10,88	3,02	100,64	3,00	77,2
	Base	3,04	7,02	0,50	1,60	1,00	97,40	10,88	3,10	100,56	3,08	77,6
7,5	Superficie	3,00	9,58	0,84	1,20	1,70	95,80	10,20	3,74	99,68	3,75	72,6
	Base	2,96	7,24	0,56	3,40	2,20	95,80	10,20	6,16	102,26	6,02	62,0
sem	Superficie	2,94	10,52	0,98	2,20	2,40	103,0	11,60	5,58	108,22	5,58	69,2
gás	Base	2,94	7,00	0,86	4,20	2,80	103,0	11.60	7,86	110,50	7,11	60,8
		MÉDIAS										
15		3,04	8,06	0,56	1,30	1,20	97,40	10,88	3,06	100,60	3,04	77,4
7,5		2,98	8,41	0,70	2,30	1,95	95,80	10,20	4,95	100,97	4,88	67,3
sem gás		2,94	8,76	0,92	3,20	2,60	103,0	11,60	6,72	109,36	6,34	65.0

SB - Soma das Bases (Ca+Mg+K)

SB/T - Saturação de Bases (SB/Tx100)

T - Capacidade de Troca Catiônica

Baseado nos resultados apresentados na Tabela 4.14, podemos observar que não ocorreram mudanças bruscas nos valores de pH do solo determinados em laboratório. Os valores indicam um pequeno aumento de pH (3,04) para os recipientes submetidos à vazão forçada de HCs gasosos em relação aos recipientes sem gás (2,94), sendo ambos os valores indicativos de um ambiente ácido.

Em consideração à concentração de matéria orgânica nos vasos, os resultados não diferem muito para as três situações, indicando um pequeno aumento da quantidade de matéria orgânica na superfície dos solos não expostos à presença dos HCs. Na base dos recipientes, as quantidades de matéria orgânica são muito parecidas. Os resultados da tabela acima mostram que os elementos trocáveis (K, Ca, Mg, H+Al, Al) apresentam concentrações maiores para os vasos sem a presença de HCs e concentrações menores nos vasos com HCs

Analisando os valores médios da saturação de bases (SB/T), observa-se que ocorreu uma diminuição da saturação com o aumento da quantidade de gás, ocorrendo o mesmo com as saturações da superfície e da base dos recipientes. Estas, da mesma forma que a soma das bases (SB), apresentam valores de concentrações maiores na porção inferior dos recipientes. Já nos recipientes com alto fluxo de gás (15 cm³/min), a saturação das bases na superfície e na parte inferior dos vasos permaneceu praticamente inalterada.

A capacidade de troca catiônica (T) sofreu um pequeno incremento nos recipientes sem a presença dos HCs, permanecendo praticamente semelhante nas duas situações com vazões diferenciadas de gás.

O aluminio (Al⁺³) apresenta um aumento diretamente proporcional dos valores de saturação em relação aos valores do fluxo forçado de HCs. Nos vasos com elevado fluxo de HCs gasosos (15 cm³/min) não ocorrem diferenças de saturação nos níveis superficiais e basais.

4.10.5 - EFEITO DOS HIDROCARBONETOS GASOSOS NA VEGETAÇÃO

Segundo Gonçalves *et. al.* (1992), os conteúdos de nutrientes na planta refletem o seu estado nutricional, assim como a fertilidade do solo. Para as plantações de eucaliptos, define intervalos de teores de nutriente que indicam deficiência, suficiência ou toxidez, sendo tais constatações realizadas através da análise do seu tecido foliar, adequadamente amostrado da parte inferior das copas e base dos galhos para o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), e do terço superior das copas e das pontas dos galhos da planta para o cálcio (Ca), zinco (Zn) e ferro (Fe). Para os eucaliptos, considerando-se árvores com boas taxas de crescimento e sem sinais de deficiência nutricional, as faixas de teores de alguns macro e micro-nutrientes consideradas adequadas são as seguintes:

Elemento	Faixa de Teores Adequados
Nitrogênio (N)	13,5 - 18,0 g/kg
Fósforo (P)	9,5 - 13,0 g/kg
Potássio (K)	9,0 - 13,0 g/kg
Cálcio (Ca)	6,0 - 10,0 g/kg
Zinco (Zn)	35,0 - 50,0 mg/kg
Ferro (Fe)	150 - 200 mg/kg

Quanto mais distante destas faixas forem os teores de nutrientes, maior será o grau de deficiência ou toxidez, respectivamente para valores inferiores ou superiores aos da faixa.

No caso das deficiências nutricionais dos elementos listados acima, os principais sintomas visuais constatados nos tecidos são apresentados a seguir.

Sintomas nos tecidos mais velhos (parte inferior das copas e base dos galhos):

• Deficiência em Nitrogênio (N) - Clorose uniforme das folhas, as quais tomam tons mais avermelhados ou amarelados, dependendo da espécie; senescência precoce das folhas, com subseqüente queda das mesmas; redução de crescimento e produção de sementes.

• Deficiência em Fósforo (P) - Pontos ou manchas roxas sobre o limbo foliar verde-escuro, os quais podem evoluir para necroses; as folhas apresentam crescimento reduzido; normalmente, há atraso do florescimento, com grande quebra na produção de sementes e redução de crescimento.

• Deficiência em Potássio (K) - Clorose nas pontas e margens das folhas que secam e se necrosam; senescência precoce das folhas; as árvores ficam mais sensíveis à deficiência hídrica do solo.

161

Sintomas nos tecidos mais jovens (terço superior das copas e ponta dos galhos):

• Deficiência em Cálcio (Ca) - Clorose evoluindo para necrose nas margens e pontas das folhas; encarquilhamento das margens dos limbos, as quais ficam voltadas para o lado superior da folha; morte dos brotos terminais; cessa o crescimento apical.

• Deficiência em Zinco (Zn) - A lâmina foliar fica estreita e alongada; há redução do tamanho dos internódios com formação de tufos terminais de folhas, tipo roseta, clorose internerval; redução da produção de sementes.

• Deficiência em Ferro (Fe) - Nervuras com reticulado verde e fino contra fundo amarelado. Em casos extremos pode ocorrer branqueamento das folhas.

Com relação ao experimento, não se sabe ao certo se as faixas de teores indicadas acima podem ser consideradas na avaliação nutricional das plantas desenvolvidas em laboratório, cujas condições, por mais adequadas que possam ser, não conseguem reproduzir exatamente o ambiente de campo.

Portanto, os resultados obtidos serão analisados comparativamente entre as situações de presença e ausência de HCs gasosos, não se levando em consideração se os teores obtidos encontram-se dentro ou fora de determinada faixa. Quando possível, será feito um confronto dos resultados das análises químicas (principalmente dos resultados obtidos das folhas dos eucaliptos) com os aspectos visuais da vegetação do experimento.

O objetivo principal é mostrar os efeitos dos HCs gasosos na concentração e na absorção de nutrientes pela vegetação, cujos cálculos foram realizados utilizando-se os resultados das análises químicas dos componentes da vegetação e das análises do seu peso seco. Para a realização das análises químicas, os componentes da vegetação foram secos, moídos e mineralizados por via úmida, empregando-se a digestão nitroperclórica, segundo metodologia descrita por Sarruge & Haag (1974).

162

As plantas utilizadas nestas análises foram cortadas dos recipientes 58 dias após o início da injeção dos gases. No caso dos eucaliptos, as plantas foram cortadas rente ao solo, tendo sido seus componentes separados em folhas, caules e ramos e raízes. Com relação às gramíneas, apenas a parte aérea foi retirada dos recipientes, não sendo feito nenhum tipo de análise nas suas raízes. Tanto as análises químicas da vegetação como as análises de peso seco foram feitas nos laboratórios do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF).

4.10.5.1 - ANÁLISE QUÍMICA DA VEGETAÇÃO

Após secagem e pesagem, os componentes dos eucaliptos e da porção aérea das gramíneas foram moídos e enviados ao laboratório do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ para a determinação da concentração de nutrientes nos seus tecidos. Foram realizadas análises químicas para determinação da concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, zinco e ferro nas folhas, ramos e caules e raízes, seguindo metodologia mencionada em Gonçalvez *et al.* (1992) e descrita por Sarruge & Haag (1974). As Tabelas 4.15 a 4.17 mostram os teores médios das concentrações de nutrientes obtidos para a vegetação contida nos recipientes do experimento. Nestas tabelas, os elementos marcados com (*) indicam que os valores médios apresentados possuem diferenças estatisticamente significantes ao nível de probabilidade de 5% (Teste de Tukey), aplicados às análises de variância dos dados obtidos nas repetições do experimento.

Tabela 4.15 ANÁLISE QUÍMICA DA VEGETAÇÃO FOLHAS DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO	NITROGÊNIO*	FÓSFORO*	POTÁSSIO*	CÁLCIO*	ZINCO	FERRO*
· · ·		(g/kg	(mg/kg)			
sem gás	9,04	2,87	7,40	2,44	78,00	164,00
7,5 cm ³ /min	7,64	1,91	6,89	1,98	66,00	118,00
15 cm ³ /min	7,15	1,66	5,44	1,36	64,00	78,00

*diferenças estatisticamente significantes

Tabela 4.16

ANÁLISE QUÍMICA DA VEGETAÇÃO RAMOS E CAULES DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO	NITROGÊNIO	FÓSFORO	POTÁSSIO	CÁLCIO	ZINCO	FERRO
		(g/k	(mg/kg)			
🐀 sem gás	2.06	1,50	1,64	1,12	34,00	56,00
7,5 cm ³ /min	1,99	1,25	1,60	0,84	32,00	74,00
15 cm ³ /min	2,11	1,16	1,40	0,76	30,00	88,00

Tabela 4.17 ANÁLISE QUÍMICA DA VEGETAÇÃO RAÍZES DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO	NITROGÊNIO*	FÓSFORO	POTÁSSIO*	CÁLCIO	ZINCO	FERRO*
		(g/kg	(mg/kg)			
sem gás .	4,28	0,99	1,90	1,40	70,00	3680
7,5 cm ³ /min	5,46	0,99	1,04	0,94	76,00	3340
15 cm ³ /min	6,01	1,37	0,84	1,12	98,00	4380

*diferenças estatisticamente significantes

Os valores apresentados na Tabela 4.15 indicam que houve um decréscimo na concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e ferro das folhas de eucaliptos na medida em que aumentou a quantidade de gás injetado nos vasos. Para o zinco, as diferenças obtidas não são estatisticamente significantes.

Para os ramos e caules (Tabela 4.16), as diferenças mais evidentes de concentração são observadas para o cálcio, fósforo e potássio, que tem suas concentrações reduzidas com o aumento da quantidade de gás injetado nos recipientes. O zinco também apresenta pequenas variações de concentração, mostrando uma tendência a diminuir sua concentração com o aumento da quantidade de gás. Já o nitrogênio apresenta um comportamento bastante diferente do observado para as folhas, constatando-se uma pequena diminuição da concentração para os vasos sem gás, embora os índices de concentração sejam praticamente parecidos. Já o ferro tem sua concentração aumentada para os recipientes com maior fluxo de gases; para os ramos e caules, nenhuma das diferenças constatadas é estatisticamente significante.

Nas raízes, os valores apresentados na Tabela 4.17 mostram uma tendência semelhante para o nitrogênio, fósforo, zinco e ferro, cujas concentrações aumentam com o aumento da quantidade de HCs injetada. Comportamento inverso é observado nas raízes para o potássio e cálcio, que têm suas concentrações diminuídas com o aumento da vazão de gás. Para as raízes, apenas as diferenças de concentrações de nitrogênio, potássio e ferro são significantes.

Tabela 4.18 ANÁLISE QUÍMICA DA VEGETAÇÃO PORÇÃO AÉREA - BRAQUIÁRIA

TRATAMENTO	NITROGÊNIO	FÓSFORO	POTÁSSIO*	CÁLCIO*	ZINCO	FERRO*
		(g/k	(mg/kg)			
sem gás	5,77	5,51	4,46	2,46	78,00	308,00
7,5 cm ³ /min	5,61	5,53	4,58	1,92	92,00	274,00
15 cm ³ /min	5,75	5,58	5,50	1,92	102,00	342,00

*diferenças estatisticamente significantes

No caso da porção aérea das gramíneas, a Tabela 4.18 mostra que não ocorreram maiores mudanças nas concentrações de nitrogênio e fósforo, havendo apenas pequeno aumento da concentração de potássio e diminuição da concentração de cálcio nas gramíneas dos vasos onde foram injetados HCs gasosos. Com relação ao zinco e ao ferro, observa-se um aumento das suas concentrações à medida que se aumenta a vazão de gases nos vasos.

4.10.5.2 - ANÁLISE DO PESO SECO DA VEGETAÇÃO

Antes da vegetação ser enviada para análise química, seus componentes foram levados a uma estufa de ventilação (65°C) e pesados até atingir um peso constante. As Tabelas 4.19 e 4.20 mostram os resultados médios das análises do peso seco para os componentes dos eucaliptos e da porção aérea das gramíneas, respectivamente.

Tabela 4.19

ANÁLISE PESO SECO FOLHAS - RAMOS E CAULES - RAÍZES DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO		PESO TOTAL (g) *		
all officer many inclusion of	FOLHAS	RAMOS E CAULES	RAIZES*	
Sem gás	61,09	131,69	125,84 •	318,61
7,5 cm ³ /min	61,07	131,18	85,36	277,61
15 cm ³ /min	57,49	118,44	75,78	251,70

*diferenças estatisticamente significantes

Tabela 4.20 ANÁLISE PESO SECO PORÇÃO AÉREA DAS GRAMÍNEAS

TRATAMENTO	PESO SECO (g) *
sem gás	188,13
7,5 cm ³ /min	175,27
15 cm²/min	164,60

*diferenças estatisticamente significantes

Pelos resultados obtidos nestas tabelas, tanto para os componentes dos eucaliptos (folhas, ramos e caules e raízes), como para a porção aérea da gramínea, constatou-se uma redução generalizada do peso seco da vegetação que se desenvolveu nos recipientes submetidos ao fluxo forçado de HCs gasosos, quando comparado com os resultados de peso seco da vegetação dos recipientes sem a presença dos gases.

4.10.5.3 - ABSORÇÃO DE NUTRIENTES

Através dos valores médios das concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, zinco e ferro, obtidos das análises químicas dos componentes dos eucaliptos e da porção aérea das gramíneas, foi possível, em conjunto com os índices de peso seco destas plantas, calcular as quantidades médias de nutrientes absorvidos pelas plantas por intermédio da seguinte fórmula:

QuantidadeConcentração do Elementode Nutrientes=Absorvidoskg de Massa Seca

Foram calculadas as quantidades médias de nutrientes absorvidos pelas folhas, ramos e caules, raízes e a quantidade de total de nutrientes absorvidos pelos eucaliptos, assim como a quantidade de nutrientes absorvidos pela porção aérea das gramíneas, cujos valores encontram-se nas Tabelas 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25, respectivamente. Foram feitos apenas os cálculos para os recipientes submetidos à vazão de 15 cm³/min e para os recipientes sem a presença dos HCs gasosos. A exemplo das tabelas anteriores, os elementos indicados com (*) mostram diferenças estatisticamente significantes.

Tabela 4.21 QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS FOLHAS DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO	QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS					
and some side and built	(g) (mg)					mg)
	NITROGÊNIO*	FÓSFORO*	POTÁSSIO*	CÁLCIO*	ZINCO	FERRO*
Sem gås	0.55	0,17	0,45	0,15	4,13	4,13
15 cm ³ /min	0,39	0,09	0,31	0,07	3,71	3,71

*diferenças estatisticamente significantes

Os valores médios da Tabela 4.21 mostram que ocorreu uma diminuição da absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, zinco e ferro nas folhas dos eucaliptos plantados nos recipientes submetidos ao fluxo forçado de HCs gasosos. Das diferenças constatadas apenas a do zinco não é estatisticamente significante.

Tabela 4.22

QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS RAMOS E CAULES DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO	QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS					
	(g) (mg)				mg)	
	NITROGÊNIO	FÓSFORO	POTÁSSIO	CÁLCIO*	ZINCO	FERRO
Sem gás	0,27	0,19	0,21	0,15	4,20	7,37
15 cm ³ /min	0,25	0,13	0,16	0,09	3,50	10,42

*diferenças estatisticamente significantes

Com relação aos ramos e caules dos eucaliptos, os índices apresentados na Tabela 4.22 mostram que as quantidades de nutrientes absorvidos são muito parecidas para o nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio. Já o zinco e o ferro apresentam valores com diferenças mais elevadas, tendo o zinco sua concentração diminuída e o ferro aumentada com o aumento da

quantidade de gases. Para os ramos e caules de eucaliptos, as diferenças observadas não são estatisticamente significantes.

Tabela 4.23 QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS RAÍZES DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO	QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS					
		(g) (mg)				
	NITROGÊNIO	FÓSFORO	POTÁSSIO*	CÁLCIO*	ZINCO	FERRO*
Sem gás	0,54	- 0,12	0,24	0,17	8,72	463,09
15 cm ³ /min	0,45	0,10	0,06	0,08	7,66	331,92

*diferenças estatisticamente significantes

Nas raízes dos eucaliptos ocorreu uma diminuição da absorção do nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, zinco e ferro para os recipientes com HCs gasoso. Destes elementos apenas a absorção de potássio, cálcio são estatisticamente significantes.

Tabela 4.24 QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS FOLHAS - RAMOS E CAULES – RAÍZES DE EUCALIPTOS

TRATAMENTO	QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS					
	(g) (mg)					mg)
	NITROGÊNIO*	FÓSFORO*	POTÁSSIO*	CÁLCIO*	ZINCO*	FERRO*
Sem gás	1,36	0,48	0,90	0.47	17,68	480,48
15 cm ³ /min	1,11	0,32	0,53	0,24	14,87	346,71

*diferenças estatisticamente significantes

Analisando os índices da tabela 4.24, os valores médios obtidos indicam que houve uma diminuição generalizada da quantidade de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, zinco e ferro absorvidos pelos eucaliptos (folhas, ramos e caules e raízes) nos recipientes submetidos ao fluxo forçado de HCs gasosos.

Tabela 4.25 QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS GRAMÍNEA - PORÇÃO AÉREA

TRATAMENTO	QUANTIDADE DE NUTRIENTES ABSORVIDOS					
		(g) (mg)				
	NITROGÊNIO*	FÓSFORO*	POTÁSSIO	CÁLCIO*	ZINCO	FERRO
Sem gás	1,08	1,07	0,84	0,46	14,65	57,94
15 cm ³ /min	0,94	0,91	0,90	0,32	16,76	56,29

*diferenças estatisticamente significantes

Para a porção aérea das gramíneas, os resultados da Tabela 4.25 mostram pequenas diminuições na absorção de nitrogênio, fósforo, cálcio e ferro para as plantas dos vasos com gás, ocorrendo o contrário com o potássio e o zinco, que têm suas absorções ligeiramente aumentadas. Apenas as variações de absorção de nitrogênio, fósforo, cálcio e ferro possuem diferenças significativas do ponto de vista estatístico.

4.10.6 - ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DE AMOSTRAS DE SOLO

As análises microbiológicas das amostras de solos foram feitas com o objetivo de avaliar os efeitos biológicos causados aos solos submetidos à contaminação de HCs gasosos. Estas análises proporcionaram ainda uma avaliação laboratorial das atividades de prospecção microbiológica adotadas pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello da PETROBRAS (CENPES) que, através do seu Centro de Excelência em Geoquímica (CEGEQ), tem utilizado esta técnica como ferramenta não convencional na avaliação da prospectividade de áreas com interesse para HCs (Santos *et al.*, 1996).

Experimentos laboratoriais (Davis, 1969) indicaram que as emanações de gases de petróleo retidos nos solos podem ser utilizados pelos micro organismos até um nível abaixo do limite cromatográfico de detecção desses gases. Desta forma, os microorganismos são importantes indicadores das emanações dos gases do petróleo.

Entre as várias técnicas disponíveis para análise microbiológica (Davis, *op. cit*), o CEGEQ empregou o método do Número Mais Provável (NMP) para a contagem dos microorganismos.

4.10.6.1 - AMOSTRAGEM E PROCEDIMENTOS ANÁLITICOS

Objetivando determinar os efeitos biológicos dos solos contaminados por HCs gasosos, foram coletadas 15 amostras de solo, sendo as amostras dos recipientes 1 a 5 e dos recipientes 11 a 15 submetidas ao fluxo forçado de HCs gasosos e as amostras dos recipientes 21 a 25 provenientes de solos não submetidos à presença de HCs gasosos. A amostragem foi efetuada em conformidade com o manual de amostragem para estudos microbiológicos do CEGEQ, onde as amostras são coletadas com o auxílio de espátulas esterilizadas e armazenadas em sacos plásticos também esterilizados, evitando-se assim contaminações externas. Uma vez coletadas, as amostras devem ser armazenadas em recipientes térmicos, cujas temperaturas devem ser mantidas em níveis baixos até que o material chegue ao laboratório de análise.

No laboratório de microbiologia do CEGEQ, cada amostra de solo foi dividida em cinco partes, adicionando-se a elas meio de cultura mineral. Posteriormente, essas cinco amostras foram diluídas dez vezes, obtendo-se 50 amostras de cultura microbiológica de cada uma das amostras originais de solo, adicionando-se em 25 delas gás etano, como fonte exclusiva de carbono. Após 30 dias de incubação, é determinado o consumo de etano pelos microorganismos e sua conseqüente produção de CO₂, este identificado por cromatografia gasosa. Os resultados analíticos são apresentados em números mais prováveis de microorganismos por grama de solo seco (NMP). Os procedimentos analíticos adotados pelo CEGEQ encontram-se descritos no Manual de Operações do Laboratório de Microbiologia do CEGEQ, versão 1 (1994).

4.10.6.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

As contagens individuais determinadas para as amostras analisadas estão na Tabela 4.26, onde os resultados analíticos são apresentados em contagens pelos números de microorganismos consumidores exclusivos de HCs por grama de solo seco. As amostras de 1 a 5, submetidas à contaminação forçada de 15 cm³/minuto de gás natural veicular (GNV) pelo período do experimento, apresentaram concentrações de microorganismos consumidores exclusivos de HCs gasosos, oscilando entre $0,76 \times 10^5$ e $0,24 \times 10^8$ por grama de solo seco, podendo-se estabelecer a média de $0,57 \times 10^7$ microorganismos.

TRATAMENTO	AMOSTRA (VASO)	MICROORGANISMOS EXCLUSIVAMENTE CONSUMIDORES DE HCs / GRAMA DE SOLO SÊCO
	la su anna an Lanna ann an Anna	2,61X10 ⁶
	2	9,76X10 ³
15 cm ³ /min	and a second	1,52X10 ⁶
	4	0,24X10 ⁶
		0,24X10 ⁸
7,5 cm ³ /min		0,26X10 ⁷
	12	0,24X10 ³
	13	0,36X10 ⁶
	- 14	0,36X10 ⁶
	15	CONTAMINADA
Sem gás	21	0,22X10 ⁴
	22	ZERO
	23	0,44X10 ⁴
	24	ZERO
	25	ZERO

Tabela 4.26 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

As amostras de 11 a 14, submetidas à uma vazão forçada de 7,5 cm³/minuto de gás, apresentaram contagens menores, oscilando entre $0,25x10^5$ e $0,26x10^7$, com média de $0,84x10^6$, inferiores, portanto, às submetidas a vazões maiores de gás natural. A amostra 15 apresentou contaminação e não foi possível estabelecer a contagem correta.

As amostras 22, 24 e 25, não submetidas ao gás, apresentaram contagens iguais a zero e as amostras 21 e 23 valores dentro dos limites estabelecido para o *background* (até 10^4), compatíveis portanto com o esperado para solos estéreis.



Figura 4.38 - Gráfico mostrando o resultado da análise microbiológica realizada nos solos do experimento.

O gráfico da Figura 4.38 ilustra os resultados médios da análise microbiológica para os recipientes com fluxo forçado de gás (recipientes com fluxo de 15 cm³/min e 7,5 cm³/min) e para os recipientes sem gás.

4.10.7 - LEVANTAMENTO DAS CURVAS ESPECTRAIS DA VEGETAÇÃO E DO SOLO

Esta etapa do trabalho corresponde ao levantamento das curvas espectrais da vegetação (folhas) e dos solos contidos nos vasos do experimento, cujo objetivo foi avaliar o comportamento espectral dos alvos submetidos ao fluxo forçado de HCs gasosos.

A aquisição dos dados radiométricos ocorreu em 5 períodos distintos (ver Tabela 3.9), sendo a primeira etapa das medidas realizada após a vegetação ter atingido um tamanho adequado (3 meses depois das mudas terem sido repicadas nos vasos) e logo após o início da injeção dos gases nos recipientes. Foram programadas várias etapas de aquisição dos dados radiométricos para, na medida do possível, avaliar a evolução espectral dos efeitos causados pela presença dos HCs gasosos, tanto na vegetação como nos solos utilizados no experimento.

As leituras radiométricas foram feitas utilizando-se um espectro-radiômetro SPETRON SE-590 (o mesmo utilizado no levantamento do SADA e que opera na faixa de 360 a 1100 nanômetros), cedido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). No caso da coleta das informações espectrais, a proposta inicial era a de utilizar um espectro-radiômetro do tipo GER-2000, que propiciaria a realização de leituras até a faixa de 2500 nm do EEM. Porém, problemas de ordem mecânica com o equipamento impediram que isto fosse feito, optando-se pela utilização do SPECTRON.

Para a vegetação, as informações espectrais foram obtidas a partir das folhas dos eucaliptos e das folhas das gramíneas. No caso dos eucaliptos, foram coletadas de cada vaso do experimento uma folha da sua porção basal, uma folha da sua porção intermediária e uma folha do topo da planta que, imediatamente após terem sido coletadas, eram rapidamente levadas para uma sala ao lado da casa de vegetação para a realização das leituras. Nos recipientes com gramíneas, foram retiradas 3 folhas de cada vaso e adotado o mesmo procedimento. Tanto para os eucaliptos como para as gramíneas, a escolha das folhas era feita

173

de forma arbitrária, tendo-se apenas o cuidado de não coletar folhas secas ou em estado de senescência (caso das folhas posicionadas na porção basal dos eucaliptos).

A Figura 4.39 mostra o SPETRON SE-590 e os seus acessórios utilizados nas leituras radiométricas das folhas da vegetação. O procedimento de leitura foi feito colocando-se as folhas retiradas dos vasos sobre o orifício da esfera integradora acoplada ao SPECTRON.

No caso dos solos, foram coletadas apenas amostras superficiais dos vasos contendo eucaliptos (5 amostras dos vasos submetidos ao fluxo forçado de 15 cm³/min de gás, 5 amostras para os vasos submetidos ao fluxo de 7,5 cm³/min de gás e 5 amostras para os vasos sem a presença de gás). Essas amostras foram coletadas na mesma data em que foram coletadas as amostras para as análise de fertilidade dos solos (18/03/96), tendo sido expostas ao fluxo forçado de HCs gasosos durante um período aproximado de quatro meses. Diferentemente dos procedimentos adotados na aquisição dos dados espectrais da vegetação, as amostras de solos secos foram analisadas no Laboratório de Radiometria (LARAD) do INPE, em São José dos Campos - SP.

Os resultados obtidos foram ordenados e tratados em planilhas de computador, sendo as curvas de comportamento espectral geradas a partir das médias calculadas para cada situação de injeção de gás.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos do levantamento das curvas espectrais da vegetação e do solo.

4.10.7.1 - LEVANTAMENTO DAS CURVAS ESPECTRAIS DA VEGETAÇÃO

Os gráficos apresentados na Figura 4.40 correspondem às curvas médias das leituras feitas sobre os folhas de eucaliptos (folhas da base, do meio e do topo dos eucaliptos) plantados nos vasos submetidos ao fluxo forçado de 15 cm³/min de HCs gasosos e dos eucaliptos plantados nos vasos sem a presença dos HCs. Embora sem a representatividade requerida para caracterizar um determinado alvo, a intenção foi a de mostrar a evolução das variações radiométricas impostas à vegetação do experimento pela presença dos HCs gasosos.



Figura 4.39 - SPECTRON SE-590 montado em uma sala nas proximidades da casa de vegetação. No tripé, o SPECTRON (caixa azul) e a esfera integradora utilizados na obtenção das medidas radiométricas das folhas dos eucaliptos e das gramíneas. Observando estas curvas, pode-se notar que um dia após o início da injeção dos gases nos recipientes, não ocorreu nenhuma diferença de comportamento espectral das folhas de eucaliptos. No entanto, a partir da segunda bateria de medidas, começaram a aparecer pequenas variações no comportamento espectral da vegetação submetida à presença dos HCs gasosos.

Onze dias após (02/12/95) o início da injeção dos gases, constatou-se um pequeno aumento nos níveis de reflectância das folhas na porção correspondente às cores verde e vermelho do espectro visível (faixa de 530 a 680 nm), acompanhada de uma pequena diminuição do nível de reflectância na porção inicial do infravermelho próximo.

Os resultados da terceira etapa, realizada em 14/12/95 (23 dias), mostram um incremento da diferença dos níveis de reflectância para as folhas dos vasos com HCs gasosos na porção visível do espectro e uma inversão dos níveis de reflectância na faixa do infravermelho próximo, quando comparado aos níveis de reflectância levantados na etapa anterior. O comportamento espectral médio observado na terceira etapa se mantém nas etapas seguintes, constatando-se pequenos acréscimos dos níveis de reflectância para a vegetação submetida ao fluxo forçado de gás à medida em que se aumenta o período de exposição aos gases.

A Figura 4.41 ilustra vários exemplos dos efeitos das deficiências nutricionais constatadas nas folhas dos eucaliptos e suas respectivas curvas de comportamento espectral.

Comparando-se as curvas das folhas afetadas por deficiências nutricionais com a curva de uma folha normal, verifica-se, na porção visível do espectro, um aumento generalizado dos níveis de reflectância, acompanhado de deslocamento e expansão da feição correspondente ao pico de reflectância da clorofila para as faixas de comprimento de onda maiores (faixas correspondentes ao amarelo e ao vermelho do espectro eletromagnético). Ainda no visível, a banda de absorção da clorofila é atenuada pela diminuição da quantidade de clorofila nas folhas, fazendo com que a curva se desloque para comprimentos de onda menores na passagem do visível para o infravermelho próximo.



Figura 4.40 - Curvas de comportamento espectral das folhas de eucaliptos.



Figura 4.41 - Exemplos dos efeitos das deficiências nutricionais constatadas nas folhas de eucaliptos e as respectivas curvas de comportamento espectral. Da esquerda para a direita, folha sadia (1), folha com deficiência em nitrogênio (2), folha com deficiência em fósforo (3), folha com deficiência nitrogênio e potássio (4), folha com deficiência em cálcio (5), folha com deficiência em cálcio e nitrogênio (6) e folha senescente (7).

A Figura 4.42 mostra as curvas de comportamento espectral levantadas para as gramíneas. No caso das gramíneas foram apenas coletadas informações em quatro períodos (22/11/95, 02/12/95, 14/12/95 e 05/01/96).

Igualmente ao observado para as folhas de eucaliptos, as folhas das gramíneas não mostraram nenhuma diferença no seu comportamento espectral 1 dia após o início da injeção dos gases nos recipientes. Observando as curvas médias do levantamento realizado em 02/12/95, pode-se observar que ocorreu um aumento significativo dos níveis de reflectância das folhas submetidas à presença dos HCs nas faixas referentes à porção visível do espectro. Na faixa correspondente à cor vermelha da porção visível do espectro e na porção inicial do infravermelho próximo, constata-se uma pequena atenuação da banda de absorção da clorofila e conseqüente deslocamento da curva ascendente para comprimentos de onda menores (deslocamento do *red edge*), quando comparado com as curvas das folhas dos vasos sem a presença dos HCs.

As curvas obtidas no período seguinte (14/12/95) mostram uma diferença bastante marcante entre as folhas das gramíneas coletadas dos vasos com HCs gasosos e das folhas das gramíneas coletadas dos vasos sem a presença dos HCs. A curva das gramíneas dos vasos com HCs mostram um acentuado aumento dos níveis de reflectância para a faixa do espectro levantado. Nesta curva pode-se observar um aumento dos níveis de reflectância na faixa correspondente à banda de absorção da clorofila, assim com a formação de um patamar, mais acentuado do que o existente na leitura da data de 02/12/95, na faixa de 620 nm.

Uma nova etapa de obtenção das curvas radiométricas foi feita em 05/01/96, só que desta vez não foi mais possível verificar diferenças espectrais nas folhas das gramíneas, pois ocorreu um ressecamento generalizado em todas as folhas dos vasos, possivelmente ocasionada pela chegada do final do seu ciclo vegetativo.

As Figuras 4.43 e 4.44 mostram, respectivamente, as folhas das gramíneas coletadas dos vasos submetidos ao fluxo forçado de HCs gasosos e as folhas coletadas dos vasos sem a presença dos HCs, em 14/12/96 (23 dias após o início da injeção dos gases).



Figura 4.42 - Curvas de comportamento espectral das folhas de gramíneas.



Figura 4.43 - Folhas de gramíneas coletadas do vaso 6 da mesa 1(mesa submetida ao fluxo forçado de 15 cm³/min.), 23 dias após o início da injeção de gás nos recipientes.



Figura 4.44 - Folhas de gramíneas coletadas do vaso 28 da mesa 3 (mesa não submetida ao fluxo forçado de gás), 23 dias após o ínicio da injeção gás nos outros recipientes.

4.10.7.2 - LEVANTAMENTO DAS CURVAS ESPECTRAIS DO SOLO

A Figura 4.45 mostram as curvas espectrais médias levantadas para os vasos da mesa 1 (vasos 1 a 5), para os vasos da mesa 2 (vasos 11 a 15) e para os vasos da mesa 3 (vasos 21 a 25) do experimento, 103 dias após o início da injeção dos gases.

Observando a Figura 4.45, pode-se dizer que não ocorrem diferenças espectrais marcantes entre os solos utilizados no experimento. Apenas constata-se que a curva média dos solos da mesa 1 (vasos 1 a 5) apresenta uma diminuição do seu albedo a partir de 570-580 nanômetros, quando comparados com as curvas médias dos solos das mesas 2 e 3, que por sua vez, mostram comportamentos muito semelhantes.



FIGURA 4.45 - Curvas de comportamento espectral média dos solos da mesa 1 (vermelho), mesa 2 (magenta) e mesa 3 (azul).

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A integração das imagens LANDSAT TM com as curvas de iso-concentração padronizada de HCs gasosos, propiciou, numa primeira abordagem, uma melhor avaliação de quais áreas estariam sendo afetadas por cada tipo gás, direcionando as avaliações preliminares.

A elaboração das imagens dos diferentes tipos de gases possibilitou uma melhor visualização, através da representação em superfícies contínuas, das áreas portadoras de elevadas concentrações dos gases de petróleo. Adicionalmente, a integração destas imagens através de composição colorida RGB permitiu uma análise sintética e simultânea das informações contidas nos mapas de iso-valores de metano, etano e HCs mais pesados que etano, indicando com maior precisão as áreas de anomalias gecquímicas de HCs.

O Índice Normalizado da Diferença da Vegetação (NDVI), possibilitou identificar feições espectrais na vegetação relacionadas às emanações naturais de HCs gasosos. Embora em escalas diferentes, essas clareiras, evidenciadas pelo processamento das imagens, apresentam semelhanças de formato com às feições de emanações de gases identificadas nas margens do Rio Paracatu (ver Figura 3.8).

A aplicação da APC no realce de feições espectrais de superfície associadas às anomalias gasosas de HCs mostrou boa correlação entre os locais portadores de alta densidade de cobertura vegetal e os solos portadores de óxidos e hidróxidos de ferro. A escolha de áreas diferentes, posicionadas em níveis altimetricos distintos, demonstrou que mesmo nos locais livres das cheias ocasionadas pelos rios São Francisco e Paracatu, as evidências das mudanças impostas aos solos e a cobertura vegetal permanecem. Cabe mencionar que nas áreas baixas, passíveis de inundações, mas com elevadas concentrações de HCs gasosos, os processos de formação de solos hidromórficos podem causar feições parecidas àquelas procuradas. Portanto, é de fundamental importância que os vários processos supergênicos de formação de solos sejam avaliados neste tipo de estudo. Além das inundações periódicas que atingem as áreas mais baixas, a dinâmica do lençol freático, dependendo da atitude do relevo (inclinação do terreno), também poderia contribuir nas alterações superficiais de solo e, conseqüentemente, da vegetação. Um exemplo deste fato é observado na imagem da Figura 5.1, onde a faixa de surgência do aqüífero (quebra do relevo próximo ao nível de base local), concentra nutrientes na forma de óxidos e hidróxidos e que foram lixiviados das porções mais elevadas da cobertura arenosa, causando assim um considerado aumento na densidade da cobertura vegetal nesta faixa de solo mais enriquecido (solos de coloração marrom-avermelhado). De uma outra forma, a dinâmica do aqüífero poderia também causar um carreamento dos gases das emanações cujos pontos de ocorrência deveriam, em princípio, se localizar em terrenos topograficamente mais elevados; mas que, com o carreamento hídrico, aflorariam em regiões mais baixas, proporcionando pontos de concentrações anômalos ao longo destas supostas faixas de surgência posicionadas próximo ao nível de base local.

As curvas espectrais dos solos coletados na região do Remanso do Fogo mostram a existência de diferenças composicionais em relação a concentração de óxidos e hidróxidos de ferro presentes nas amostras. As amostras posicionadas dentro das anomalias geoquímicas de HCs gasosos não apresentam as bandas de absorção típicas dos óxidos e hidróxidos de ferro, fato que explica a coloração acinzentada destes solos, em detrimento da coloração marrom-avermelhado para as outras. Com relação aos argilo-minerais, as curvas não mostram diferenças composicionais entre os solos, ocorrendo apenas uma pequena diferenciação na quantidade de caolinita, que parece ser maior nas amostras coletas fora das anomalias de HCs. Tal constatação parece ser responsável pela diminuição dos níveis dos fatores de reflectância observado nos solos posicionados fora das áreas de anomalias.

As constatações feitas através das curvas espectrais dos dosséis da floresta de eucaliptos levantadas pelo SADA, indicam diferenças que se generalizam para as duas espécies estudadas (*Eucalyptus urofila* e *Eucalyptus camaudulenses*), independentemente da sua idade. As variações observadas nos espectros levantados mostram coerência com as quantidades de HCs totais existentes nos respectivos locais. Nas áreas com elevadas concentrações de HCs gasosos ocorre uma diminuição da quantidade de pigmentos totais das folhas do dossel da floresta, aumentando o nível dos fatores de reflectância das curvas na região visível do espectro eletromagnético. Já na região do infravermelho próximo os fatores



Figura 5.1 Vista em perspectiva da área de estudo enfatizando as áreas onde se concentram óxidos e hidróxidos de ferro carreados pelo aqüífero. Nesta mesma faixa observa-se uma maior densidade de cobertura vegetal causada pela maior disponibilidade de nutrientes (Imagem LANDSAT TM 4R/3G/1B obtida em 12/06/1995).

de reflectância das curvas diminuem quando comparados com os fatores dos dosséis posicionados fora das anomalias, indicando diferenciações na densidade e estrutura da cobertura vegetal. No caso destas curvas, as áreas de solo exposto impõem configurações um pouco diferente das normais para a vegetação, principalmente na porção visível do espectro. Ainda com relação as curvas do dossel da floresta de eucaliptos, as médias obtidas das 3 curvas levantadas para cada ponto, proporcionaram uma maior representatividade aos resultados. Além de proporcionar uma melhor visualização das diferenças impostas ao dossel da floresta de eucaliptos, a simulação das bandas do LANDSAT TM, a partir das curvas levantadas pelo SADA, permitiu dar um direcionamento ao fotointerprete que trabalha com sensores orbitais, de qual seria o provável comportamento espectral do dossel de uma floresta de eucaliptos submetido a ação de HCs gasosos (não se sabe ainda se o mesmo comportamento ocorreria em outro tipo de floresta).

Os resultados obtidos dos fatores de reflectância aparente contidos na imagem LANDSAT TM mostram comportamentos semelhantes aos dos dados simulados pelo SADA. As diferenças dos níveis de reflectância observadas nas faixas correspondentes às bandas 1 e 2 (níveis mais elevados do que os observados nos dados do SADA quando comparados com os níveis da banda 3), estão diretamente relacionados aos efeitos impostos pelo espalhamento atmosférico que afeta de forma mais acentuada as imagens não corrigidas das bandas 1 e 2. O fato de não ter sido feita a correção do espalhamento atmosférico nesta etapa, deve-se a não disponibilidade de informações precisas dos parâmetros atmosféricos para aquela área na época da aquisição da imagem. Mesmo se utilizássemos o Método de Subtração do Pixel Escuro (Chavez, 1975), este apenas minimizaria de forma grosseira os efeitos do espalhamento atmosférico apenas na banda 1 (Moran et. al., 1991). Este procedimento, além de não corrigir adequadamente os efeitos impostos às outras bandas, não contemplaria os efeitos causados pela absorção atmosférica, propiciando, desta forma a obtenção de dados imprecisos sobre as informações radiométricas da cena. Como a intenção era apenas verificar comparativamente a possibilidade de detecção das variações impostas ao dossel da floresta de eucaliptos, tal correção não foi efetuada, permanecendo assim as diferenças relativas constatadas pelas curvas obtidas pelo SADA.

Embora não coincida exatamente com as datas do levantamento realizado com o SADA (03 e 04/05/1995), a imagem LANDSAT de 12/06/1995 corresponde à cena existente

mais próxima ao período de aquisição dos espectros do dossel da floresta de eucaliptos. portanto, condições "supostamente semelhantes" relacionadas contemplando, às características estruturais do dossel (mesma época do ano). Com relação às condições atmosféricas desses dois períodos, pressupõe-se que, embora pudessem ocorrer variações nas condições atmosféricas, essas variações seriam pequenas e estariam dentro de uma margem de erro compatível com a baixa resolução espectral do TM. Aparentemente, levando-se em consideração as informações de qualidade da imagem de 1995 fornecida pelo INPE, associadas às características das bandas visualizadas durante o processamento e às condições atmosféricas observadas durante os dois dias de trabalho de campo com o SADA, partiu-se do princípio que, de um modo geral, os dois períodos apresentavam condições atmosféricas "semelhantes". Para estas duas datas, é de se esperar pequenas variações dos ângulos de elevação e azimute solar, fato que imprime pequenas variações nas taxas de energia incidente e, consequentemente, refletida pelos alvos. O ideal seria se tivéssemos programado o levantamento com o SADA em uma data de passagem do satélite, o que foi impossível. devido aos problemas de planejamento da missão junto à Força Aérea Brasileira.

Os dados obtidos através dos parâmetros biométricos da cobertura vegetal, dos NDVIs e do IAFs comprovam as previsões feitas nas etapas onde foram utilizados os produtos de sensoriamento remoto, dando maior sustentação aos resultados. Deste modo, foi possível obter informações mais precisas e seguras sobre as características da cobertura vegetal existente dentro e fora das áreas portadoras de HCs gasosos, reforçando as hipóteses inicialmente levantadas neste estudo com relação aos efeitos de HCs gasosos sobre a vegetação.

Cabe ressaltar que os resultados obtidos na identificação de áreas portadoras de anomalias geobotânicas, através das técnicas de sensoriamento remoto, foram facilitados por se tratar de uma área de monocultura (floresta de eucaliptos). No caso da aplicação destas técnicas em outras áreas, não se sabe ao certo se tais procedimentos apresentariam os mesmos resultados. Possivelmente, as alterações impostas aos eucaliptos deveriam ocorrer também em outras espécies vegetais. No entanto, tal afirmação ainda merece ser melhor avaliada através de novos estudos.
Com relação as informações obtidas no mapa de anomalia bouguer, no perfil sísmico e no levantamento dos elementos estruturais da superfície do terreno, pode-se dizer que as feições levantadas enquadram-se plenamente dentro do esperado para a região, confirmando as previsões feitas na análise dos elementos regionais obtidos no levantamento bibliográfico (capítulo 2). As feições superficiais levantadas em campo mostram relações de concordância com as feições gravimétricas impressas no mapa de anomalia bouguer (que retrata o arcabouço estrutural da bacia pré-existente) e com as falhas interpretadas no perfil sísmico.

Os elementos estruturais obtidos no ponto 2, indicam a existência de uma zona de falha não classificada devido a ausência de indicadores cinemáticos. No entanto, levando-se em consideração as componentes regionais e a análise das feições estruturais identificadas na área de estudo, tudo indica que a maior parte destas falhas correspondam à um sistema de falhas inversas, associadas a falhas normais (ver perfil sísmico da Figura 4.22).

Dos elementos estruturais obtidos, as juntas de tração são as que melhor serviram para explicar alguns fenômenos importantes que atuaram na área. Por ocupar uma posição fixa e não ambígua dentro do quadro deformacional da bacia, as juntas de tração indicam as direções preferenciais de esforços compressivos atuantes na área e que deram origem aos caminhos preferências percorridos pelos HCs gasosos em direção à superfície.

Levando-se em consideração as constatações feitas no ponto 7, surge aí uma surpresa, pois os elementos estruturais analisados indicam a existência de esforços compressivos com vergência para sudoeste, diferente dos esforços com vergência para noroeste amplamente descritos pela literatura. Tal constatação nos dá uma informação importante que mostra o porquê da não existência de acumulações comerciais de hidrocarbonetos nesta região. Este ponto apresenta um quadro de feições estruturais completamente distintas das que se manifestam nas áreas de abrangência da confluência dos rios São Francisco e Paracatu. Tal afirmação se baseia na identificação de juntas abertas posicionadas praticamente à 90 graus das feições identificadas no domínio dos pontos 1 a 6, além da existência de pequenos *duplex*. apresentando planos de falha com vergência para o sudoeste. Neste caso, os dados levantados não permitem estabelecer relações temporais entre estas duas porções, pois não foi possível encontrar um afloramento que mostrasse tais evidências.

Sem sombra de dúvidas, a região estudada apresenta dois campos de esforços atuantes ortogonais entre si. Na suposição de que os esforços compressivos responsáveis pelas feições identificada no ponto 7 seja posterior aos responsáveis pelas feições dos outros pontos, a região estaria bastante comprometida no que diz respeito a acumulação de HCs gasosos. pois estes esforços atuariam deformando ("abrindo") os principais *trends* estruturais do substrato estabelecido pela tectônica formadora da bacia. No entanto, do ponto de vista da ocorrência dos HCs gasosos em superfície, estes campos de esforços explicam a existência dos *trends* de concentrações de gases nas direções gerais SW-NE e SE-NW (ver Figura 4.2) que também são coincidentes com os foto-lineamentos estruturais marcados na porção superior do mapa apresentado na Figura 2.2.

De acordo com os dados obtidos do perfil sísmico, as falhas marcadas mostram o porquê das ocorrências de gás nos horizontes relacionados às formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas, durante a perfuração do poço 1-RF-1-MG e também, o porquê do borbulhamento no poço Jacarezinho e nas margens do Rio Paracatu. Nota-se portanto, a existência de uma grande família de estruturas notáveis (com direções gerais SW-NE) que atuam como dutos na conexão entre possíveis rochas geradoras e as possiveis rochas reservatório, que pela sua natureza, atingem a superfície do terreno, caracterizando as emanações gasosas. Estas falhas também imprimem um certo condicionamento fisiográfico para alguns dos aspectos observados em superfície, limitando as coberturas arenosas, as áreas inundáveis do rio Paracatu e encaixando alguns segmentos das drenagens principais e secundárias.

Com relação aos HCs gasosos, acredita-se que estes foram gerados nas seqüências pré-Bambuí, em regiões posicionadas à sudeste da área de estudo e que atingiram o Remanso do Fogo por migração a longa distância (~100 a 150 km). Tal migração pode ter ocorrido através das seqüências psamíticas existentes abaixo da seqüência Bambuí e/ou através dos sistemas de falhas e fraturas subjacentes. Outra possibilidade reside na migração lateral auxiliada pela dinâmica do lençol freático. Os aspectos fisiográficos regionais colocam os terrenos existentes à oeste e sudoeste em posições altimétricas mais elevadas, uma vez que a área de estudo encontra-se em posição relativamente mais baixa por estar próxima ao nível de base regional (área de confluência dos rios São Francisco e Paracatu). Desta forma, o fluxo do aqüífero que migra em direção aos níveis de base da região poderiam carrear os HCs. De uma maneira mais coerente, os dois processos poderiam estar atuando de uma forma conjunta.

Coincidentemente, a região do Remanso do Fogo encontra-se localizada numa área de transição entre um baixo (leitura na ordem de –100 mGals) e um alto gravimétrico relativo (leitura na ordem de –80 mGals) configurando um alto estrutural gravimétrico, possivelmente limitado por falhas, cujas direções coincidem com as feições evidenciadas em campo e no perfil sísmico (ver Figuras 4.20, 4.22 e 4.32). A mudança acentuada do relevo gravimétrico, também poderia justificar a presença de uma zona de falha de direção SW-NE, que interceptaria os gases em migração, direcionando-os para a superfície.

Podemos dizer que os *trends* SW-NE correspondem à antigas falhas normais do embasamento que foram reativadas pelo tectonismo compressivo relacionadas ao ciclo brasiliano, e que atualmente correspondem a um sistema de falhas transcorrentes destrais, fruto dos resultados dos processos de acomodação de natureza compressional. Portanto, de acordo com os elementos estruturais levantados, este *trend* e as famílias de juntas abertas (N30E e N40W) compõem as variáveis que controlam a presença dos HCs na superfície do terreno.

Iniciando as discussões sobre os resultados obtidos no experimento observa-se que mesmo apresentando pequeno porte, as mudas de eucaliptos com poucos dias após a brota já mostravam nítidos sinais de deficiência nutricional, na forma de ressecamento das extremidades de algumas folhas, possivelmente induzida pela presença dos HCs nos recipientes. Acredita-se que, nesta fase inicial do experimento, a falta de oxigênio nos poros do solo tenha agido como um dos fatores principais, interferindo no crescimento das mudas dos eucaliptos e das gramíneas. O fluxo forçado de gases no interior do recipiente atuou inicialmente ocupando os espaços que anteriormente eram ocupados pelo oxigênio, dificultando desta forma a absorção de água e de nutrientes pelas raízes das pequenas plantas.

Com relação as leituras de potencial redox (E_H), os valores apresentados mostram que ocorreram variações ao longo do experimento, confirmando uma queda na intensidade das reações no interior dos recipientes contendo HCs e interferindo na absorção e na disponibilidade de nutrientes para a vegetação.

Para os valores de pH, não foram verificadas grandes mudanças que pudessem ser mencionadas. Os valores obtidos apenas indicam o caráter ácido dos solos contidos no recipiente.

Comparando os valores de E_H obtidos com os valores mencionados por Oliveira *et al.* (1993) no estudo do potencial redox de solos alagados, podemos dizer que ao longo do experimento os recipientes submetidos ao fluxo forçado de HCs gasosos passaram de um ambiente oxidante no início do experimento (9 dias), para um ambiente redutor (doador de elétrons) com 86 dias (valores abaixo de 300 mV) e em seguida, no final (133 dias), novamente para um ambiente oxidante. Já os solos dos recipientes sem a presença de gás permaneceram, do início ao final da experiência, com um ambiente oxidante (valores de E_H acima de 300 mV), ou seja, receptor de elétrons.

Cabe mencionar que, além da presença dos HCs, o nível de enraizamento dos eucaliptos dentro dos vasos também pode ter contribuído na diferença dos valores de E_H obtidos.

Com relação aos resultados obtidos nas análises de mineralogia total e mineralogia de argilas, a não constatação de mudanças na composição mineral das amostras como um todo e na composição dos argilo-minerais se deve ao curto período de tempo que essas estiveram submetidas ao fluxo forçado de HCs gasosos. Provavelmente, períodos mais longos de exposição induziriam à algum tipo de mudança mineralógica.

A constatação da mudança das cores marrom-amarelado escuro para marrom, no final do período de injeção de HCs, indica uma tendência de mudança química dos íons de ferro que apresentam cores mais escuras quando na condição de íon ferroso (Fe⁺²), em detrimento de cores mais amareladas e avermelhadas para o íon férrico (Fe⁺³).

Com base nos dados de coloração de solos apresentados, confirma-se as previsões anteriores que evidenciam a falta de tempo suficiente para que ocorressem mudanças significativas nas características físicas dos solos submetidos à presença dos HCs gasosos.

Pelas análises realizadas, a quantidade de matéria orgânica nos solos apresenta relação direta com a quantidade de matéria vegetal que se desenvolveu nos recipientes e que, por sua vez, também apresenta uma relação inversa com a quantidade de gás injetado. Os valores médios apresentados mostram apenas esta tendência, uma vez que os valores obtidos são muito próximos.

Observa-se que, de um modo geral, a concentração de elementos trocáveis no solo diminui com o aumento da quantidade de HCs nos recipientes. Dos elementos analisados, o Ca e o Mg parecem ter sua mobilidade reduzida pela presença dos HCs, o mesmo não ocorrendo nos recipientes sem a presença de HCs, que mostraram concentrações maiores em sua base.

A capacidade de troca catiônica apresenta uma boa correlação com os dados obtidos nas leituras do potencial redox, que tiveram seus valores diminuídos para as situações de solos submetidos à presença de HCs gasosos.

A diminuição da saturação de bases (SB/T) nos recipientes com HCs, associada à mesma diminuição da soma das bases (SB), indica uma possível lixiviação destes elementos para a parte inferior dos vasos. Com relação aos valores de saturação em alumina, os resultados mostram que houve um aumento da sua concentração nos recipientes contendo HCs gasosos, impondo uma maior toxidade para estes vasos.

Baseado nos resultados das análises químicas da vegetação, observa-se que as concentrações dos elementos N, P, K, Ca, Zn e Fe, existentes nos eucaliptos e nas gramíneas, diminuem nos espécimes submetidos ao fluxo forçado HCs gasosos.

Os valores obtidos da análise do peso seco dos eucaliptos e da porção aérea das gramíneas mostram que ocorre uma diminuição da biomassa com o aumento da quantidade de gases injetados nos recipientes que, no caso de uma situação de campo, corresponderia a uma diminuição na densidade da cobertura vegetal.

A análise da quantidade de nutrientes absorvido pelas plantas indica que ocorre uma diminuição generalizada da absorção de N, P, K, Ca, Zn e Fe nas plantas submetida à

presença dos HCs gasosos. Este fato explica a mudança de coloração observado nas folhas dos eucaliptos e das gramíneas sob a influência dos gases.

Levando-se em consideração as constatações feitas nas análises químicas (quantificação das concentrações de N, P, K, Ca, Zn e Fe) e também nos resultados obtidos pela análise da absorção de nutrientes nos eucaliptos e nas gramíneas, serão apresentadas e discutidas algumas das mudanças visuais observadas nas características das plantas submetidas ou não à presença dos HCs gasosos.

As alterações da vegetação que serão aqui relatadas referem-se à segunda fase do experimento, cujas mudas foram inicialmente semeadas em local separado e, posteriormente, repicadas nos vasos do experimento após um período de um mês. Depois de repicadas nos vasos, as plantas permaneceram por mais um período de três meses sem que houvesse a injeção forçada dos HCs gasosos, até que as mudas crescessem e atingissem um tamanho adequado para a realização das medidas espectro-radiométricas. As Figuras 5.2 e 5.3, mostram, respectivamente, as mudas de eucaliptos e gramíneas com 30 dias e com 70 dias após a repicagem feita nos vasos e antes do início da injeção do gás. Neste período a vegetação se desenvolveu normalmente sem que fossem identificadas quaisquer evidências marcantes de deficiência nutricional. A Figura 5.4 ilustra os eucaliptos e as gramíneas num estágio mais avançado (5 meses - aproximadamente 150 dias) durante o período em que os HCs gasosos já estavam sendo injetado nos recipientes.

Com o início da injeção dos gases, 90 dias após a repicagem das mudas nos vasos, foi constatada uma série de alterações na vegetação. A primeira delas foi notada nas folhas das porções basais dos eucaliptos plantados nos vasos com a presença de gás. Nestes vasos constatou-se uma aceleração dos processos de senescência das folhas com conseqüente antecipação da sua queda (Figura 5.5).

Outras constatações feitas ao longo do experimento referem-se à presença de folhas com problemas estruturais de formação, associados à processos de clorose e necrose das suas extremidades, principalmente nos níveis basais e intermediários das plantas. Ainda com relação à estrutura das folhas, pôde-se observar o aparecimento de galhos apresentando folhas com o limbo encurvado, possívelmente oriundos de problemas estruturais internos causados



Figura 5.2 - Mudas de eucaliptos e gramíneas 30 dias após terem sido repicadas nos vasos.



Figura 5.3 - Mudas de eucaliptos e gramíneas 70 dias após terem sido repicadas nos vasos.



Figura 5.4 - Eucaliptos e gramíneas com 5 meses de idade durante a fase de injeção dos hidrocarbonetos gasosos.



Figura 5.5 - Folhas em senescência precoce na porção basal dos eucaliptos plantados nos vasos submetidos ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos.

indiretamente pela presença dos HCs. As Figuras 5.6 e 5.7 ilustram os problemas estruturais constatados nas folhas dos eucaliptos e que devem, segundo a bibliografia consultada, ter sido causados pelas deficiências de absorção de cálcio e nitrogênio.

Ainda com relação à estrutura das folhas dos eucaliptos, observou-se que algumas das folhas das plantas submetidas ao fluxo forçado de gás apresentavam-se mais translúcidas (mais finas e com menos pigmentos) do que as folhas dos vasos sem os HCs, apresentando também pequenos pontos de clorose de formato circular espalhados pela sua superfície. As Figuras 5.8 e 5.9 mostram, respectivamente, a folha sadia de uma planta, sem a interferência dos HCs, e a folha de uma planta afetada pelo gás, cujas feições apresentadas são indicativas da deficiência dos micro-nutrientes zinco e ferro.

Outras constatações referem-se à presença de folhas com diferentes graus de deficiência em nitrogênio. As fotos das Figuras 5.10 e 5.11, mostram folhas com sinais característicos de deficiência neste macro elemento e que, por sua vez, se constitui no elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Pode-se também observar que o início do processo de clorose inicia-se nas partes centrais das folhas, disseminando-se para as outras regiões. O amarelado generalizado das folhas é forte indicativo da deficiência de nitrogênio.

Também foi observada a existência de folhas cujos limbos apresentam pontos de pigmentação arroxeados (Figura 5.12), que constitui um sinal indicativo da deficiência em fósforo. Muitas vezes os sinais de deficiência de um determinado elemento foram observados simultaneamente a sinais indicativos da deficiência de outros elementos. Este é o caso do exemplo mostrado na Figura 5.13 que mostra sintomas conjuntos de deficiência em fósforo e nitrogênio, e na Figura 5.14, cujas folhas parecem indicar deficiências conjuntas de potássio, fósforo e nitrogênio.

Como parâmetro de comparação, a Figura 5.15 mostra o aspecto de folhas sadias existentes nos vasos não submetidos à presença de HCs gasosos.

De um modo geral, avaliando-se visualmente o conjunto das folhas dos eucaliptos plantados nos vasos com gás e sem gás, observa-se que ocorre uma clorose generalizada das



ł

Figura 5.6 - Sintoma de deficiência em cálcio e nitrogênio, onde se observa folha de eucalipto com problemas estruturais de formação, associado a um estado avançado de clorose que evolui para necrose das suas margens laterais.



Figura 5.7 - Sintoma de deficiência em cálcio e nitrogênio, onde se observa ramo de eucalipto com folhas jovens apresentando limbos com margens encarquilhadas.



Figura 5.8 - Folha sadia de eucalipto plantado em vaso sem a presença de hidrocarbonetos gasosos. Folha colocada de frente para a irradiação solar.



Figura 5.9 - Folha de eucalipto plantado em vaso submetido ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos e colocada de frente para a irradiação solar. Observe que, quando comparada com a folha da Figura 5.8, esta encontra-se mais translúcida à irradiação solar, mostrando pequenos pontos de clorose nos espaços internervais da folha. Provável sintoma de deficiência em zinco.



Figura 5.10 - Folha de eucalipto mostrando sinais de deficiência em nitrogênio. Observe que o processo de clorose, típico deste tipo de deficiência, inicia-se na porção central da folha, disseminando-se radialmente para as outras regiões.



Figura 5.11 - Folhas de eucaliptos apresentando sintoma avançado de deficiência em nitrogênio, associado a sinais de deficiência em fósforo (manchas de cor arroxeada).



Figura 5.12 - Folha de eucalipto mostrando sinais de deficiência em fósforo. As manchas arroxeadas espalhadas pela folha são indicativas deste tipo de deficiência.



Figura 5.13 - Folha de eucalipto mostrando, simultaneamente, sintomas de deficiência em fósforo e nitrogênio.



Figura 5.14 - Folhas de eucaliptos mostrando sintomas conjuntos de deficiência em potássio, fósforo e nitrogênio.



)

Figura 5.15 - Folhas sadias de eucaliptos plantados nos vasos não submetidos ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos.

folhas. Este fenômeno inicia-se na base e estende-se para as porções superiores e laterais das plantas, acelerando os processos de senescência. Em conseqüência disto ocorre uma diminuição da área foliar da planta, fato que irá se refletir diretamente na quantidade de biomassa e na densidade da cobertura vegetal (ver Figuras 5.16 e 5.17). As evidências de deficiências nutricionais, embora ilustradas separadamente nas figuras, ocorrem na realidade de forma simultânea e generalizada nas plantas do experimento, imprimindo, logicamente, feições conjuntas de cada sintoma específico. Com base nos sintomas observados, a presença dos HCs atua negativamente e de forma mais marcante na absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e zinco, embora possa também estar influenciando na absorção de outros macro e micro-nutrientes como o ferro, cujos sintomas não são muito evidentes, ou não se manifestam de forma tão marcante como os sintomas dos elementos citados.

Com relação aos ramos e caules dos eucaliptos, não foi observada nenhuma diferença marcante que pudesse representar algum parâmetro de diferenciação importante. Já nas raízes foram nítidas as diferenças constatadas após a sua retirada dos vasos, que ocorreu no final do experimento. Nos vasos submetidos ao maior fluxo forçado de HCs gasosos, o grau de enraizamento das plantas foi muito menor quando comparado com o grau de enraizamento dos vasos onde não foram injetados gases (ver Figura 5.18). Outro aspecto observado nas raízes refere-se à sua coloração que, nos recipientes onde se injetou a maior quantidade de gás, aparece mais escura do que a das raízes dos outros vasos.

Nas gramíneas, a presença dos HCs parece ter causado efeitos mais uniformes. Após um período de 30 dias, as folhas dos vasos submetidos ao fluxo forçado de gases passaram a apresentar uma tonalidade mais amarelada (clorose), indicando uma diminuição da taxa de clorofila nas folhas e, conseqüentemente, uma redução da eficiência do processo fotossintético (fato que também ocorre nas folhas de eucaliptos). A exemplo dos eucaliptos, isto se deve aos problemas de absorção de nutrientes gerados indiretamente pela presença dos HCs. As Figuras 5.19 e 5.20 mostram, respectivamente, as gramíneas plantadas nos vasos sem a presença dos HCs e as gramíneas plantadas nos vasos submetidos ao fluxo forçado de gases de petróleo.

Convém ressaltar que o único fator diferencial existente nos substratos onde foram plantados os eucaliptos e as gramíneas, refere-se à presença ou não dos HCs gasosos. Todos



Figura 5.16 - Aspecto geral dos eucaliptos submetidos ao fluxo forçado de hidrocarbonetos gasosos, no final do experimento. Observe a clorose generalizada que ocorre principalmente na porção basal das plantas, fato que contribui para a diminuição da sua área foliar e, conseqüentemente da sua biomassa.



Figura 5.17 - Aspecto geral dos eucaliptos que não foram submetidos à presença dos hidrocarbonetos gasosos, no período final do experimento. Observe que as plantas encontram-se sadias, não apresentando sinais de deficiência nutricional.



Figura 5.18 - Comparação das raízes dos eucaliptos retiradas dos recipientes do experimento. Da esquerda para a direita pode-se ver o aspecto das raízes submetidas ao fluxo forçado de 15 cm³/min. (mesa 1), das raízes submetidas ao fluxo forçado de 7,5 cm³/min. (mesa 2) e das raízes não submetidas à presença de hidrocarbonetos gasosos(mesa 3). Observe que ocorre uma diminuição do grau de enraizamento das plantas na medida em que aumenta a quantidade de gases injetados nos recipientes.



Figura 5.19 - Aspecto das gramíneas plantadas nos vasos não submetidos à presença de hidrocarbonetos gasosos, 30 dias após o início da injeção dos gases nos outros recipientes.



Figura 5.20 - Aspecto das gramíneas plantadas nos vasos submetidos à presença de hidrocarbonetos gasosos, 30 dias após o início da injeção dos gases. Observe que as folhas das gramas apresentam-se com uma coloração amarelada quando comparadas às folhas das gramas dos vasos não submetidos à presença dos hidrocarbonetos (ver Figura 5.19), indicando sinais de colorose e conseqüêntemente de deficiência nutricional. os outros fatores, como tipo de solo e quantidade de água utilizada diariamente para molhar das plantas, eram rigorosamente idênticos, justamente para se ter uma idéia dos efeitos exclusivos dos HCs gasosos sobre os solos e, conseqüentemente, sobre a vegetação neles plantadas. Daí a certeza de que os fatores acima comentados se referem exclusivamente à presença dos gases e dos seus efeitos diretos e/ou indiretos.

Os resultados obtidos através da análise microbiológica de amostras de solo mostram claramente a proliferação de bactérias consumidoras de HCs nos recipientes contendo gases, reforçando a hipótese da importância destes microorganismos nas transformações químicas do ambiente dos solos e, conseqüentemente, da disponibilidade de nutrientes para a cobertura vegetal. Os resultados obtidos também serviram para testar e comprovar a eficácia da metodologia de análise microbiológica nos trabalhos de prospecção de HCs que é amplamente utilizado pela PETROBRAS na avaliação de áreas com interesse para petróleo.

Com relação aos dados radiométricos levantados para as folhas dos eucaliptos observa-se que, nos recipientes com gás, ocorre uma atenuação e um encurtamento da banda de absorção da clorofila (porção correspondente à cor vermelha do EEM), associado ao deslocamento lateral da curva para comprimentos de onda menores na faixa de transição entre o visível e o infravermelho próximo (deslocamento do red edge). O aumento dos níveis de reflectância na porção visível, principalmente nas faixas correspondentes às cores verde e vermelha do espectro, é explicado pela mudança de coloração das folhas dos eucaliptos submetidos à presença dos HCs gasosos que, conforme mostrado anteriormente, tendem a assumir tons amarelados devido à diminuição da quantidade de clorofila (clorose), imposta pelas deficiências nutricionais constatadas. Na faixa do infravermelho próximo, o aumento dos níveis de reflectância das folhas encontra-se relacionado à deterioração da sua estrutura interna e à uma diminuição do grau de turgidez das suas células. A maior quantidade de água presente na estrutura das folhas sadias faz com que uma maior quantidade de radiação seja absorvida, diminuindo assim o albedo das curvas. Em todos os exemplos de deficiência apresentados (Figura 4.41), as curvas mostram valores mais elevados de reflectância, tanto na faixa do vísivel, como do infravermelho próximo. Com relação ao comportamento espectral das gramíneas, estas apresentam comportamento parecido ao observado para as folhas de eucaliptos, diferindo apenas nos níveis gerais dos fatores de reflectância; que nos caso das gramíneas são mais elevados. No último período de tomada das medidas radiométricas das

Este trabalho se caracterizou por apresentar uma iniciativa pioneira de abordagem onde foram integradas informações e ferramentas de diversas origens. A metodologia utilizada e os resultados obtidos potencializam aplicações tanto na área da exploração de HCs como na área ambiental.

ł

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados desta pesquisa, acredita-se ter contribuído para o desenvolvimento dos processos de identificação de HCs em superficie, através da integração de dados de sensoriamento remoto, geoquímica de superficie, geofísica, geologia estrutural e espectrometria de reflectância.

Os dados apresentados comprovam os efeitos das emanações de HCs gasosos nos solos e na floresta de eucaliptos, concluindo que:

• A integração das imagens LANDSAT TM com os dados de geoquímica de superfície facilitou a localização das áreas afetadas pelo escape de gases de petróleo.

A transformação dos dados geoquímicos em imagens proporcionou uma melhor representação dos gases metano, etano e HCs mais pesados que o etano, permitindo, através da composição colorida RGB, uma análise sintética e simultânea das áreas portadoras de elevadas concentrações de HCs gasosos.

 A análise dos resultados do processamento digital das imagens LANDSAT TM mostrou resultados positivos na identificação de áreas anômalas relacionadas às emanações de HCs gasosos, a despeito das limitações de resolução espacial e espectral deste sensor.

♦ A aplicação do Índice Normalizado da Diferença de Vegetação (NDVI) possibilitou a identificação de anomalias espectrais circulares na superficie do terreno, relacionadas aos pontos de intensa exsudação de HCs gasosos. Embora os mapas de anomalias geoquímicas de hidrocarbonetos representem de forma satisfatória a distribuição dos gases em superficie, as evidências de campo demonstram que as emanações gasosas de maior expressão são localizadas, não sendo identificadas através da amostragem realizada no levantamento geoquímico (~500 metros). Mesmo assim, as curvas de iso-concentração

possibilitaram um direcionamento geral de avaliação das áreas portadoras dos gases termoquímicos.

A análise por principais componentes (APC) realçou anomalias espectrais conjuntas de solo e vegetação, espacialmente relacionadas com as áreas portadoras de elevadas concentrações de HCs gasosos. Nas áreas posicionadas próximo ao nível de base local, as inundações periódicas causadas pelas cheias dos rios São Francisco e Paracatu também podem contribuir para a formação de solos desprovidos de óxidos e hidróxidos de ferro (formação de solos hidromórficos). Mesmo em áreas de elevadas concentrações de HCs, a dinâmica do lençol freático, dependendo da inclinação do terreno, condiciona mudanças nas características espectrais do solo e da floresta de eucaliptos, carreando nutrientes das regiões mais elevadas para as mais baixas. O carreamento hídrico também pode concentrar HCs nas regiões próximas ao nível de base local.

• A análise espectral das amostras de solos, coletadas nas áreas de anomalias geoquímicas de HCs, mostram alterações significantes no albedo das curvas, principalmente na faixa localizada abaixo de 550 nm. Solos localizados dentro das áreas de influência das emanações gasosas apresentam fatores relativos de reflectância mais elevados, associados à ausência de feições significativas de absorção no espectro visível e infravermelho próximo, devido às baixas concentrações de óxidos de ferro nesses locais. As cores acinzentadas desses solos, em nítido contraste com as cores marrom-avermelhado dos solos das áreas circunvizinhas, são interpretadas como resultante da remoção desses minerais contendo o íon férrico, induzida pelos HCs gasosos. Nas porções mais distantes do espectro infravermelho (intervalo entre 1.300 a 2.500 nm) as mesmas feições de absorção típicas de argilo-minerais (caolinita) foram observadas para os solos das áreas anômalas e de fora delas, não se constatando portanto, variações no tipo de argilo-mineral presente.

• Os resultados obtidos no levantamento espectral do dossel da floresta de eucaliptos, através de espectrometria aérea (SADA), mostram diferenças espectrais entre os dosséis da floresta de eucaliptos localizados nas áreas de anomalias geoquímicas de HCs e da floresta de eucaliptos fora das mesmas. Nas áreas submetidas à influência dos HCs gasosos as curvas mostram fatores de reflectância mais elevados na porção visível do EEM, quando

comparados com as curvas obtidas do dossel da floresta de eucaliptos posicionado fora das áreas de anomalia. Este fato indica uma diminuição da quantidade total de pigmentos nas folhas do dossel das áreas afetadas. No infravermelho próximo, ocorre uma diminuição dos fatores de reflectância para os dosséis das áreas sob a influência dos HCs, em detrimento de fatores mais elevados para os dosséis circunvizinhos, relacionando-se o fenômeno à diminuição da densidade da cobertura vegetal.

Apesar de terem sido obtidas em datas diferentes, os fatores de reflectância aparente médios (FRAMs) extraídos das imagens LANDSAT TM mostram boa correlação com os resultados das simulações realizadas com o SADA. As curvas mostram o mesmo comportamento relativo para as 4 bandas. As únicas diferenças constatadas referem-se aos níveis dos fatores de reflectância mais elevados para as bandas do sensor orbital e que diminuem da banda 1 para a banda 3, enquanto, para estas mesmas faixas dos espectro, aumentam nas simulações feitas com os dados do SADA. Tal fato é explicado pela maior influência do solo nas medidas realizadas pelo sensor aeroportado e também pelo efeito do espalhamento atmosférico que afeta principalmente as bandas 1 e 2 do TM.

♦ As estimativas de área basal média (m²/ha) e do volume de madeira (m³/ha), feitas através do levantamento biométrico da vegetação, mostram valores reduzidos para as áreas portadoras de elevada concentração de HCs, ocorrendo o mesmo com os índices de NDVI, estimados pelos dados do SADA, e FRAM, extraídos das imagens LANDSAT TM.

• Constatou-se, para a maioria dos pontos, índices de áreas foliares (IAF) menores para os pontos correspondentes aos locais de elevada concentração de HCs gasosos.

 Os dados obtidos através dos parâmetros biométricos da cobertura vegetal, dos NDVIs e dos IAFs comprovam as previsões feitas nas etapas onde foram utilizados os produtos de sensoriamento remoto, dando maior sustentação àqueles resultados.

Através dos parâmetros biométricos da vegetação, das estimativas dos NDVIs
 e dos IAFs, obteve-se informações complementares da cobertura vegetal existente dentro e

fora das áreas portadoras de HCs gasosos, comprovando-se as hipóteses anteriormente levantadas.

Os dados estruturais levantados na área de estudo explicam os fatores que condicionam a presença dos HCs gasosos em superfície e se enquadram perfeitamente no contexto estrutural previsto para este domínio da Bacia do São Francisco, onde os *trends* estruturais N30-40E configuram as principais feições delineadas.

As feições levantadas no campo mostram relações de concordância com as feições gravimétricas, impressas no mapa de anomalia bouguer, e com as falhas interpretadas no perfil sísmico.

Duas famílias de juntas (juntas de tração) posicionadas nas direções N30E e N40-60W, associadas ao *trend* de falhas de direção N30-40E, condicionam as emanações gasosas existentes na área de estudo e os caminhos de migração utilizados pelos HCs.

 As falhas de empurrão interpretadas no perfil sísmico explicam as ocorrências de gás no poço 1-RF-1-MG e também os borbulhamentos constatados no poço Jacarezinho e na margem do Rio Paracatu.

A família de juntas de direção N30E mostra uma direção de compressão não previsto para a área de estudo, comprometendo a possibilidade de ocorrências de acumulações significativas de HCs gasosos na região.

Amostras de solo e vegetação submetidas ao fluxo forçado de HCs gasosos tem suas propriedades físicas, químicas e espectrais modificadas quando comparadas com amostras de solo e vegetação não submetida ao fluxo forçado de gases de petróleo.

• O fluxo forçado de HCs gasosos em amostras de solo inibe a germinação de sementes de eucaliptos e gramíneas, pois a presença dos gases no interior dos recipientes atua

inicialmente ocupando os espaços que anteriormente eram ocupados pelo oxigênio, dificultando desta forma a absorção de água e de nutrientes pelas raízes das plantas.

• Ao longo do experimento, constatou-se variações no potencial redox $(E_{\rm H})$ dos solos contidos nos recipientes, confirmando uma queda na intensidade das reações no interior dos vasos submetidos ao fluxo forçado de HCs, fato que interfere na absorção e na disponibilidade de nutrientes para a vegetação.

 Não foram observadas mudanças na composição mineral e na composição dos argilo-minerais das amostras submetidas ao fluxo forçado de HCs gasosos.

 Observa-se nos solos dos vasos submetidos ao maior fluxo forçado de HCs gasosos uma pequena mudança de coloração (de marrom-amarelado escuro para marrom), indicando uma tendência de mudança química (Fe⁺³ para Fe⁺²).

• A quantidade de matéria orgânica presente nos vasos é diretamente proporcional a quantidade de gás injetado.

• A concentração de elementos trocáveis no solo diminui com o aumento da quantidade de HCs injetados nos recipientes.

• A capacidade de troca catiônica sofreu um pequeno incremento nos recipientes sem a presença dos HCs.

 Ocorre um aumento de toxidade nos vasos submetidos ao fluxo forçado de HCs (aumento da quantidade de aluminio - Al⁺³).

As análises químicas da vegetação mostram diferenças nas concentrações de N,
 P, K, Ca, Zn e Fe entre as espécies sob condições normais e àquelas submetidas ao fluxo forçado de HCs gasosos.

 Os resultados da simulação feita em laboratório mostram que ocorreram mudanças nos aspectos físicos, químicos e espectrais das amostras de solo e vegetação submetidas ao fluxo forçado de HCs gasosos.

Levando-se em consideração os resultados obtidos nas várias etapas desta pesquisa, conclui-se que foram atingidos os objetivos definidos.

O procedimento metodológico adotado neste trabalho, embora mostrando bons resultados, merece ainda ser melhor testado e avaliado para posteriores aplicações em outras áreas com interesse exploratório para HCs.

A floresta de eucaliptos, por tratar-se de uma monocultura e por constituir uma comunidade vegetal exótica implantada na região, contribuiu de forma a facilitar a identificação das alterações impostas pela presença dos HCs gasosos. Já em áreas de cerrado, onde as espécies são bastantes diversificadas e altamente adaptadas ao estresse hídrico, a identificação das mudanças impostas pelos HCs torna-se tarefa mais difícil e requer estudos muito mais profundos e específicos. Para tanto as experiências acumulados neste trabalho constituem fatores importantíssimos para o início destas pesquisas.

O clima da área de estudo atuou como importante aliado neste tipo de abordagem, pois facilitou a identificação dos efeitos impostos pelos HCs aos solos e à cobertura vegetal. Acredita-se que em áreas de clima mais úmido, como é o caso da floresta amazônica, a elevada disponibilidade de água venha a interferir como fator limitante, atuando de forma negativa na identificação das possíveis alterações.

No entanto, acredita-se que os problemas relatados acima poderão ser mais facilmente abordados através da utilização de novos sensores dotados de maior resolução espectral e espacial. A utilização de sensores termais também constituem um outro campo de pesquisas neste tipo de atividade e merece ser avaliada.

De forma prática e imediata, as constatações realizadas na pesquisa, assim como o entendimento dos processos dos efeitos impostos à cobertura vegetal pelo escape de HCs

gasosos, poderão vir a ser utilizados na identificação de pequenos vazamentos de HCs ao longo de dutos da PETROBRAS. O plantio de culturas adensáveis ao longo destas faixas poderiam ser utilizadas como biomarcadores de vazamentos de HCs não detectados pelos sistemas de segurança. Tal procedimento, além da economia de recursos para a empresa, proporcionaria uma melhor adequação destes projetos com os aspectos sociais e ambientais, tão valorizados nos dias de hoje.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M.J.; Ashley, R.P.; Rowan, L.C.; Goetz, A.F.H. & Kahle, A.B. 1977. Mapping of hydrotermal alteration in Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for spectral region 0.46 to 2.36 microns. Economy Geology, vol. 5: 713-718.
- Alkmim, F.F. & Chemale Jr., F. 1989. Geologia estrutural e estratigrafia do Supergrupo São Francisco ao longo da seção regional Serra do Cipó- Campos Altos. In: SIMP. GEOL. MINAS GERAIS, 5, Belo Horizonte, 1989. Roteiro de Excursão...Belo Horizonte, SBG/NMG. 38p.
- Alkmim, F.F.; Chemale Jr., F.; Barcellar, L.A.; Oliveira, J.P.; Magalhães, P.M. 1989. Arcabouço estrutural da porção sul da Bacia do São Francisco. In: SIMP. GEOL. MINAS GERAIS, 5, Belo Horizonte, 1989. Anais... Belo Horizonte, SBG/NMG. P.289-293.
- Alkmim, F.F.; Chemale Jr., F.; Endo, I. 1993. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e o seu significado tectônico. Rev. Bras. Geoc. (no prelo).
- Almeida, F.F.M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. DNPM -Divisão de Geologia e Mineralogia. P.1-36 (Boletim 241).
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. Rev. Bras. Geoc., 7: 349-364.
- Almeida, F.F.M. 1968. Evolução tectônica do Centro-Oeste brasileiro no Proterozóico superior. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 40 (suplemento): 285-295, Rio de Janeiro.
- Amaral, G. & Kawashita, K. 1967. Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 21, Curitiba, 1967. Anais... Curitiba, SBG. P214-217.
- Amaral, G.; Mattos, J.T.; Almeida F^o, R.; Cunha,R.P. & Paradella, W.R. 1976. Carta Geológica ao milionésimo da folha Belo Horizonte com base na interpretação de imagens LANDSAT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto, 1976. Anais... Ouro Preto, SBG. V.4, P229-238.

Andrade Lima, D. de, 1966. Atlas Geográfico do Brasil. IBGE, Rio de Janeiro.

- Andrade Ramos, J.R. 1956. Folha geológica da nova capital. Relatório Anual do Diretor. DNPM - Divisão de Geologia e Mineralogia, P.40-44.
- Anjos, S.M.C.; Carvalho, C.R.F.; Mencarelli, R.M.L.& Silva, C.F. 1997. Análise por difratometria de raios-X da mineralogia de amostras de solo da Bacia do São Francisco.
 Rio de Janeiro. Relatório Interno (Comunicação Técnica).
 PETROBRÁS/CENPES/DIGER (03-97). 4p.
- Babinski, N.A. 1986. Origem e detecção de hidrocarbonetos na superfície. Boletim Técnico da PETROBRAS 29(4):271-276.
- Babinski, N.A. & Santos, R.C.R. 1987. Caracterização geoquímica das exsudações de Buritizeiro - MG, Bacia do São Francisco - Avaliação Preliminar. Rel. Int. Rio de Janeiro. PETROBRAS/CENPES/DIVEX/SEGEQ. 12p.
- Babinski, N.A. & Santos, R.C.R., 1990. A prospecção geoquímica de superfície na PETROBRAS. Análise dos Resultados Exploratórios. Rel. Int. Rio de Janeiro. -PETROBRAS/CENPES/SEGEQ.
- Babinski, N.A. & Santos, R.C.R. 1991. Análise dos resultados exploratórios da prospecção geoquímica de superfície na exploração petrolífera das bacias sedimentares brasileiras.
 Rio de Janeiro. Relatório Interno.
- Baptista, M.B.; Braun, O.P.G. & Campos, D.A.1984. Léxico Estratigráfico do Brasil. CPRM/DNPM. Brasília, 560p.
- Barbosa, O. 1965. Série Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 19, Rio de Janeiro. SIMPÓSIO DAS FORMAÇÕES EO-PALEOZÓICAS DO BRASIL. Publicação avulsa, 15p. PETROBRAS/CENPES/DIVEX/SEGEQ.

Barbosa, O. 1967. Projeto Chaminés. Relatório PROSPEC/DNPM. Rio de Janeiro 87p.

Barcellar, L.A.P. 1989. Geologia Estrutural do Supergrupo São Francisco ao Longo da Seção
Regional Coromandel - Três Marias - Conselheiro Mata, MG. Ouro Preto. 128p.
(Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia - Escola de Minas - Universidade
Federal de Ouro Preto).

- Barcellar, L.A.P.; Alkmim, F.F. 1993. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton
 São Francisco ao longo da seção Coromandel Três Marias Conselheiro Mata (MG).
 In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador, 1993.
 Anais...Salvador. P.208-211.
- Bokova, E.N. 1954. Oxidation of ethane and propane by certain species of mycobacteria. Mikrobiologia. 23:15-21.
- Bonhonme, M.G.1976. Mineralogie des fractions fines et datations rubidium-strontium dans le Groupe Bambuí, Minas Gerais, Brésil. Revista Brasileira de Geociências, 6(4):211-222.
- Braun, O.P.G. 1968. Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 22, Belo Horizonte, 1968. Anais...Belo Horizonte, SBG. P.155-166.
- Braun, O.P.G. 1982. Aspectos geomorfológicos que afetam a interpretação de imagens de sensores remotos no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2, Brasília, 1982. Anais...Brasília, INPE. V1, P.25-38.
- Braun, O.P.G. 1988. Mapeamento de semi-detalhe em área para prospecção de hidrocarbonetos na Bacia Proterozóica do Bambuí, no centro leste de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, 1988. Anais...Belém, SBG. V.2,P.673-687.
- Braun, O.P.G.; Martins, M. & Oliveira, W.J. 1993. Continuidade das seqüências rifeanas sob a Bacia do São Francisco constatadas por levantamentos geofísicos em Minas Gerais.
 In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador. 1993. Anais...Salvador. P.164-166.
- Braun, O.P.G.; Martins, M.; Paula, L.; Silva, P.R. & Medeiros, R.A. 1996. Novas Bases para uma reavaliação estratigráfica das seqüências mapeadas como Grupo Paranoá, Traíras e Bambuí, em Goiás e Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, Salvador, 1996. Anais...Salvador. SBG. V.5. P.506-509.

Braun, O.P.G. 1997. No prelo.

- Brooks, R.R. 1983. Biological Methods of Prospecting For Minerals: John Wiley & Sons, New York, 322 p.
- Burlen, K. 1956. Die angeblichen palaeozoischen orogenesen auf dem brasilianischen shild. Neuves Jahrbuch fur geologie und palaontologie, Monatschefte, 12:535-542.
- Bushnell, L.D. & Hass, H.F. 1941. The utilization of certain hidrocarbons by microorganisms. Journal Bacteriol., 41:653-673.
- Campos Neto, M.C. 1979. Lithostratigrafie et Structure des Groupes Canastra, Paranoa et Bambui dans l'ouest-nord-ouest de l'etat de Minas Gerais (Bresil). Paris, 155p. (These de 3º cycle, Université Pierre et Marie Curie).
- Campos Neto, M.C.1984. Geometria e fases de dobramentos brasilianos superpostos no oeste de Minas Gerais. Revista. Brasileira de Geociências, 14: 60-68.
- Cardoso, R.N. 1973. Nota sobre a geologia do Grupo Bambuí na região de Buenópolis MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracajú, 1973. Resumo das comunicações. SBG. V.1;P.109-111.
- Carter, J.S. & Koger, D.G. 1988. Successful applications of remotely sensed data for oil and gas exploration. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 6, Houston - Texas, 1988. Proceedings...Huston. ERIM. V.1, P.19-25.
- Cassedanne, J.P. 1982. Structures organiques des carrierès du Riacho do Campo (Inhaúma Minas Gerais). Anais da Acadamia Brasileira de Ciências 54:185-186.
- CETEC FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. 1980. Projeto PLANOROESTE II - Escala 1:500 000.
- CETEC FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. 1983. Diagnóstico ambiental do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte. V1. (Série de Publicações Técnicas, 10.)
- Chang, S.H. & Collins, W., 1983. Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration technique using laboratory methods. Economic Geology, 78:723-736.

- Chang, H.K.; Miranda, F.P.; Magalhães, L.; Alkmim, F.F. 1988. Considerações sobre a evolução tectônica da Bacia do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, 1988. Anais...Belém, SBG. V.5, P.2076-2090.
- Chavez Jr., P.S. 1975. Atmospheric, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery. American Society of Photogrammetry, Proceedings of Annual Meeting, Arizona.
- Chemale Jr., F.; Alkmim, F.F.; Endo, I. 1992. Late proterozoic tectonism in interior of the São Francisco Craton. In: Simpósio da Gondwana, 5.
- Chiavegatto, J.R.S. 1992. Análise Estratigráfica das Seqüências Tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico superior), na Porção Meridional da Bacia do São Francisco.216p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto).
- Chiu, H.Y. & Collins, W.E. 1978. A spectroradiometer for airborne remote sensing, Photogramm. Eng. Remote Sensing, V.44:507-517.
- Cloud, P. & Dardenne, M. 1973. Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil. Geological Society of America Bulletin, 84:1673-1676.
- Cordani, U.G.; Thomas Filho, A.; Brito Neves, B.B. & Kawashita, K. 1985. On the applicability of the Rb/Sr method to argillaceous sedimentary rocks: some example from precambriam sequences in Brazil. Gionale di Geologia,, Ser.3, 47 (1-2):253-280.
- Costa, M.T. & Branco, J.J.R. 1961. Roteiro para excursão Belo Horizonte Brasília (Contribuição ao XIV Congresso Brasileiro de Geologia). Publicação do Instituto de Pesquisas Radioativas, (15):1-119.
- Costa, L.A.M.; Angeiras, A.G.; Valença, J.G. & Stevenazzi, V. 1970. Novos conceitos sobre o Grupo Bambuí e sua divisão em tectonogrupo. Boletim de Geologia. Rio de Janeiro, 5:3-34.
- Couto, J.G.P.; Teixeira, W. & Cordani, U.G. 1983. Considerações sobre as principais épocas de fraturamento do Cráton do São Francisco, com base em datações K-Ar de rochas básicas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2. Belo Horizonte. SBG. Boletim 3, P.38-49.
- Crósta, A.P. 1990. Mapping of Residual Soils by Remote Sensing for Mineral Exploration in SW Minas Gerais State, Brazil. London. 452p. (PhD Thesis, Imperial College, University of London).
- Crósta, A.P. 1992. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas. IG-UNICAMP. 170p.
- Crósta, A.P. 1992. O uso do sensoriamento remoto na detecção de hidrocarbonetos em superfície (Texto sobre palestra proferida na PETROBRAS em setembro de 1992). Salvador.
- Crósta, A.P. & Moore, J. McM. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 7, Calgary, 1989. Proceedings...Calgary, ERIM. P.1173-1187.
- Crósta, A.P. & Rabelo, A. 1993. Assessing Landsat/TM for hydrothermal alteration mapping in Central-Western Brazil. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 9, Pasadena, 1993. Proceedings...Pasadena, Califórnia, USA. ERIM. 9p.
- Cunha, F.M.B., 1979. Estudo preliminar das microexsudações do Rio Juruá AM por imagens de satélite. Rio de Janeiro. Relatório Interno PETROBRAS. 17p.
- Cunha, F.M.B., 1981. Estudo da microexsudações gasosas na região do Rio Juruá, Bacia do Alto Amazonas (Solimões), mediante a utilização de sensoriamento remoto por satélite. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS/CENPES/DIVEX/SEGEL.
- Cunha, F.M.B., 1982. Significado das reflectâncias anômalas registradas na vegetação da Bacia do Alto Amazonas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2, Brasília, 1982. Anais...Brasília, INPE. V.1, P.169-177.
- Dalziel, M.C. & Donovan, T.J. 1981. Biogeochemical Evidence for Subsurface Hydrocarbon Occurrence, Recluse Oil Field, Wyoming: Preliminary Results. U.S. Geological Survey Circular 837.

- Danderfer Filho, A. 1990. Análise Estrutural Descritiva e Cinemática do Supergrupo Espinhaço na Região da Chapada Diamantina (BA). 119p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto).
- Dardenne, M.A. 1978. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Anais...Recife, SBG. V.1,P.229-308.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Anais...Recife, SBG. V.2, P.597-610.
- Dardenne, M.A. 1979. Os grupos Bambuí e Paranoá na faixa dobrada Brasília. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOLOGIA DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E DE SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1, Salvador, 1979. Anais...Salvador, SBG. P.140-157.
- Davis, J.B.; Chase, H.H. & Raymond, R.L. 1956. *Mycobacterium paraffinicum sp.*, a bacterium isolated from soil. Appl.Microbiol., 4:310-315.
- Davis, J.B. 1969. The role of microbiology in petroleum exploration. In: Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas. Dallas, Southern Methodist University. 1:139-157.
- Davis, S.H. 1977. The effect of natural gas on tress and other vegetation. Journal of Arboriculture, 3(8):153-154.
- Derby, O.A. 1880. Contribuição para o estudo da geologia do Vale do São Francisco. Arquivos do Museu Nacional, 4:89-119.
- Dominguez, J.M.L. 1993. As Coberturas do Cráton do São Francisco: Uma Abordagem do Ponto de Vista da Análise de Bacias. In: O CRÁTON SÃO FRANCISCO: Trabalhos da reunião preparatória do II SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, Salvador -BA. P.137-159.
- Donovan, T.J. 1974. Petroleum Microssepage at Cement, Oklahoma: Evidence and Mechanism. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 58(3):429-446.
- Donovan, T.J. & Dalziel, M.C. 1977. Late diagenetic indicators of burried oil and gas. U.S. Geological Survey Open-File Report 77-817, 44p.

- Donovan, T.J. 1974. Petroleum Microseepage at Cement, Oklahoma: Evidence and Mechanism: AAPG Bulletin, 58(3):429-446.
- Donovan, T.J., Roberts, A.A. & Dalziel, M.C. 1981. Epigenetic Zoning in Surface and Near-Surface Rocks Resulting from Seepage-Induced Redox Gradients, Velma Oil Field, Oklahoma: A Synopsis: Shale Shaker, November.
- Drury, S.A. 1987. Image Interpretation in Geology. 1 ed. London. Allen & Unwin. 243p.
- Drury, S.A. 1993. Image Interpretation in Geology. 2 ed. London. Chapman & Hall. 283p.
- Dutra, A.C. & Nunes, L.P. 1987. Proteção Catódica, Técnica de Combate à Corrosão. Rio de Janeiro. Mcklausen Editora.
- EARTH SATELLITE CORPORATION (EARTHSAT). 1983. A Proposal Spectral Detection of Hydrocarbon Induced Superficial Alteration. Chevy Chase, Maryland, USA.
- EMBRAPA. 1979. Levantamento Exploratório Reconhecimento de Solos do Norte de Minas Gerais - Escala 1:750 000 - SNLCS/EMBRAPA.
- Epiphanio, J.C.N. & Formaggio, A.R. 1988. Abordagens do Uso de Número Digital e de Reflectância em Sensoriamento Remoto com Dados de Satélite. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5, Natal, 1988. Anais...Natal. INPE. V.2, P.400-405.
- Eschwege, W.L. 1832. Beitrage zur Gebirgekunde Bresilien; Mit Vier Petrographischen Geognosticken Karten und Profildursnilten. Berlin, 488p.
- Fernandes, P.E.C.A.; Montes, M.L.; Braz, E.R.C.; Montes, A.S.L.; Silva, L.L.; Oliveira, F.L.L.; Ghignone, J.I.; Siga Jr., O. & Castro, H.E.F. 1982. Projeto Radambrasil (Folha SD 23 - Brasília) 29:25-204.
- Flower, F.B., Gilman, E.F. & Leone, I.A. 1981. Landfill gas, what does to trees and how its injurious effects my be prevented: Journal of Arboriculture, p.43-52.
- Freyberg, B. 1932. Ergebnisse e geologischer forschungen in Minas Gerais. Brasilien. Neuses Jahrbuch fur Mineralogie, Geologie und Paleontologie, 2:1-401.

- Fuck, R.A.; Marini, O.J.; Dardenne, M.A. & Figueiredo, A.N. 1988. Coberturas metassedimentares do proterozóico médio: os Grupos Araí e Paranoá na região de Niquelândia-Colina (GO). Revista Brasileira de Geociências, 18(1):54-62.
- Gardner, G. 1846. Travels in the Interior of Brazil, Principally Through the Northern Provinces and the Gold and the Diamond Districts During the Years 1836 - 1841. London. Reeve-Brothers. 526p.
- Goel, N.S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophsical parameters from reflectance data. Remote Sensing Reviews, 4(1): 212.
- Gonçalves, J.L.M.; Kageyama, P.Y.; Freixêdas, V.M.; Gonçalves, J.C. & Geres, W.L.A. 1992. Capacidade de absorção e eficiência nutricional de algumas espécies arbóreas tropicais. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2. Anais. P.463-469.
- Hernandes, G.L.S. 1994. Processamento Digital de Imagens Landsat-TM e Geoscan/AMSS na Caracterização Lito-Estrutural e Delimitação de Alteração Hidrotermal na Área do Depósito Aurífero de Riacho dos Machados (MG). Campinas. 134 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas).
 - Hunt, G. R. & Ashley, R.P. 1979. Spectra of altered rocks in visible and near-infrared. Economic Geology, 74:1613-1629.
 - Hunt, G. R. & Salisbury, J.W. 1970. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I Silicate Minerals. Modern Geology, 1:283-300.
 - IEF Instituto Estadual de Floresta. 1994. Mapa de Cobertura Vegetal e Uso do Solo do Estado de Minas Gerais - escala 1:1 500.000. Contrato BIRD/SEPLAN/IEF-MG.
 - Inda, H.A.V. & Barbosa, J.F. 1978. Texto Explicativo para o mapa geológico do Estado da Bahia - escala. 1:1.000.000. Salvador. SME/CPM. 137p.
 - Irwin, M.L. 1965. General theory of epeiric clear water sedimentation. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 49:445-468.
 - Jackson, M.J. 1988. Studies on Petroleum Geology and Geochemistry, Middle Proterozoic, MacArtur Basin Northern Australia: Petroleum Potencial. In: APEA Journal, 28:283-301.

- Jardim de Sá, E.F.; Bartels, R.L.; Brito Neves, B.B. & Mcreath, I. 1976. Geocronologia e o modelo tectono-magmático da Chapada Diamantina e Espinhaço Setentrional, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 29, Ouro Preto, 1976. Anais...Ouro Preto, SBG. V.4, P.205-227.
- Jardim de Sá, E.F. 1981. A Chapada Diamantina e Faixa Santo Onofre: um exemplo de tectônica infra-placa no Proterozóico médio do Cráton S. Francisco. In: GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DA BAHIA. Sec. de Minas e Energia do Estado da Bahia, Textos Básicos, V.4, P.111-120.
- Jensen, H.L. 1934. Studies on saprophytic mycobacteria and corynebacteria. Proc. Lennean. Soc. N. S. Wales, 59:19-61.
- Jobson, A.M., Cook, F.D. & Westlake, D.W.S. 1978. Interaction of aerobic and anaerobic bacteria in petroleum biodegradation. Chemical Geology, 24:355-365.
- Kartsev, A.A. 1959. Geochemical methods of prospecting and exploration for petroleum and natural gas: English Translation P.A. Witherspoon and W.D. Romey, Berkeley, Univ. California Press, 347 p.
- Kattah, S.S. 1991. Análise Faciológica e Estratigráfica do Jurássico Superior/Cretáceo Inferior na Porção Meridional da Bacia San Franciscana, Oeste do Estado de Minas Gerais. Ouro Preto. 227p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia -Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto).
- Kawashita, K.; Mizusaki, A.M.P. & Kiang, C. H. 1987. Razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr em sedimentos carbonáticos do Grupo Bambuí (MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1, Porto Alegre, 1987. Anais...Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geoquímica. V.1, P.133-137.
- Kawashita, K.; Thomaz Filho, A.; Brito Neves, B.B.; Cordani, U.G.; Macedo, M.H.F. & Soliani Jr., E. 1996. Reavaliação das idades Rb/Sr do Grupo Una com base na composição isotópica do Sr em carbonatos In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, Salvador, 1996. Anais...Salvador, SBG. V.6, P.533-535.
- Kiang, C.H. 1987. Bacia do São Francisco: pré-cambriano brasileiro com hidrocarbonetos . Boletim de Geociências. PETROBRAS. Rio de Janeiro. 1(2):235-240.

- Kiehl, J.C. 1982. Oxidação e Redução no Solo. Apostila preparada para a Disciplina LSG-800
 Química do Solo, do Curso de Pós-Graduação de Solos e Nutrição de Plantas.
 Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".
 Piracicaba. 30p.
- Krauskopf, K.B.1979. Introduction to Geochemistry. New York. McGraw-Hill Book Co. 617p.
- Lagoeiro, L.E. 1990. Estudo da Deformação nas Seqüências do Grupo Una, na Região de Irecê, BA. Ouro Preto. 102p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto).
- Lang, H.R.; Alderman, W.H. & Sabins, F.F. 1984. Patrick Draw, Wyominng, Petroleum Test Case Report: The NASA/Geosat Test Case Project. In: Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, USA, 2(11):1-112.
- Lang, H.R.; Curtis, J.B. & Kovacs, J.S. 1985b. Lost River, West Virginia, Petroleum Test Site: The NASA/Geosat Test Case Project. In: Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, section 12.
- Lee, D.C.L. 1995. Comunicação verbal.
- Lesquer, A.; Almeida, F.F.M.; Davino, A.; Lachaud, J.C. & Mailard, P. 1981. Signification structurale des anomalies gravimetriques de la partie sud du Craton du São Francisco (Brésil). Tectonophysics, 76:273-293.
- Liais, E. 1872. Climats, Géologie, Faune et Geographie Botanique du Brésil. Paris, Geoge Chamerot, 640p.
- Lopes, J. N. 1991. Projeto mapas metalogenéticos e de revisão de recursos minerais. Folha SE.23-V-B (São Romão). Texto explicativo organizado por Jane Nobre Lopes. Brasília. DNPM. 32p.
- Loughlin, W. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 57(9):1163-1169.
- MACBETH A DIVISION OF KOLLMORGEN CORPORATION, 1975. Munsell Soil Color Charts. 2441 North Calvert Street, Baltimore, Maryland 21218.

- Magalhães, L. 1988. Análise Estrutural Qualitativa dos Sedimentos do Grupo Bambuí, Região Sudeste da Bacia do São Francisco (Faixa Sete Lagoas - Serra do Cipó). Ouro Preto. 109p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto).
- Magalhães, P.M. 1989. Análise Estrutural Qualitativa das Rochas do Grupo Bambuí, na Porção Sudoeste da Bacia do São Francisco. Ouro Preto 100p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de geologia - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto).
- Malhorta, R.V.; Birneir, R.W. & Johnson, G.D. 1974. Detection of surperficial changes associated with hydrocarbon seepage - Sheep Mountain Anticline, Birghorn Basin, Wyoming. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 7, Calgary, 1974. Proceedings...Calgary-Alberta-Canada, ERIM. V.2, P.1097-1110.
- Marchese, H.G. 1974. Estromatólitos "Gymnosolenides" no lado oriental de Minas Gerais, Brasil. Revista Brasileira de Geociências, 4 (4): 257-271.
- Marinho, F. 1991. Levantamento gravimétrico na Bacia do São Francisco. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS/DEPEX.
- Marinho, F. 1993. Interpretação dos dados gravimétricos e aeromagnetométricos da porção central da Bacia Proterozóica do São Francisco noroeste do Estado de Minas Gerais.
 In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador, 1993.
 Anais...Salvador, SBG. P.170-172.
- Martins, M.; Teixeira, L.B. & Braun, O.P.G. 1993. Considerações sobre a estratigrafia da Bacia do São Francisco com base em dados de subsuperfície. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador, 1993. Anais...Salvador, SBG. P.167-169.
- Mather, P.M. 1987. Computer Processing of Remotely-Sensed Images. Chichester, John Wiley & Sons. 352p.
- Mattos, J.T. 1986. Caracterização do Comportamento Geológico-Estrutural na Região da Represa de Furnas (MG), Com Dados de Sensoriamento Remoto. São Paulo. 186p. (Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).

- Melo, M.R.; Babinski, N.A.; Gonçalvez, F.T. & Miranda, F.P. 1996. Hydrocarbon prospecting in the Amazon rain forest: application of surface geochemical, microbiological, and remote sensing methods. In: Hydrocarbon migration and its nearsurface expression. AAPG. Memoir 66, p.401-411.
- Melo, U. & Piazza, H.D. 1984. Revisão das possibilidades petrolíferas do Grupo Bambuí. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS/DEPEX/SEBINT.
- Melo, U. & Jesus, J.A. 1987. A exsudação de gás do Remanso do Fogo, Bacia do São Francisco. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS/DEPEX/SEBINT.
- Melo, U.; Piazza, H.D. & Jesus, J.A. 1991. Possibilidades petrolíferas da bacia proterozóica do São Francisco. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS/DEPEX/DITEC/SEBINT.
- Menezes. P.R.; Assad, E.D. & Sano, E.E. 1991. Introdução ao Processamento de Imagens Digitais de Satélites de Sensoriamento Remoto. 1 ed. Brasília, Editora Universidade de Brasília. 95 p.
- Milton, N.M., 1983. Use of reflectance spectra of native plant species for interpreting airborne multispectral scanner data in the east Tintic Mountains, Utah: Econ. Geol., v.78, p.761-769.
- Miranda, F.P. & Cunha, F.M.B. 1981. Automatic analysis of Landsat multispectral data as a source of additional information for hydrocarbon exploration in the Alto Amazonas Basin. Paper presentes at COGEODATA - IAMG Meeting for South America, Rio de Janeiro, Brazil.
- Misi, A. 1976. As Seqüências Bambuí no Estado da Bahia e as Mineralizações de Chumbo-Zinco Associadas. Salvador. 80p. (Tese de Livre Docência, Universidade Federal da Bahia).
- Misi, A. 1978. Ciclos de sedimentação e mineralizações de chumbo-zinco nas seqüências Bambuí (Supergrupo São Francisco). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Anais...Recife, SBG. V.6, P.2548-2561.
- Misi, A. 1979. O grupo Bambuí no Estado da Bahia. Geologia e recursos Minerais do Estado da Bahia. Textos Básicos. SME/CPM, p.120-154.

- Moeri, E. 1972. On a columnar stromatolite in the precambrian Bambui group of central Brazil. Eclogae Geologicae Helvtiae, 65(1):185-195.
- Mogilevskii, G.A. 1940. The bacterial method of prospecting for oil and natural gas. Razvedka Nedr., 12:32-43.
- Moore, B. 1964. Geological reconnaissance of north São Francisco Basin and adjacent areas, Belém Relatório Interno nº1968. PETROBRAS.
- Moran, M.S.; Jackson, R.D.; Slater, P.N.; Teillet, P.M. 1991. Comparison of atmospheric correction procedures for visible and near-IR satellite Sensor Outpout. In: International Colloquium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, 5Th. Courchevel, France. Proceedings (ESA SP-319, May 1991) p. 7-12.
- Morgan, K.M.; Morris-Jones, D.R. & Koger, D.G. 1982. Applying Landsat data to oil and gas exploration along the Texas Gulf Coast. Oil and Gas Journal, September, p.326-327.
- Morse, J.C. & Alewine, J.W. 1983. Airborne radiometrics: case study of Patrick Draw field. Wyoming. Oil and Gas Journal, November, p.145-147.
- Moutinho da Costa, L.A. & Inda, H.A.V. 1982. O aulacógeno do Espinhaço. Ciências da Terra, 2:13-18.
- Murray, G.E. 1980. Indigenous precambrian petroleum revised. AAPG BULL, USA 64(10):1681-1700.
- NATIONAL AERONAUTICS ADMINISTRATION NASA. 1984. A prospectus for Thematic Mapper research in the earth sciences. NASA, Greenbelt, MD, 71p.
- Neves, B.B.B; Kawashita, K.; Cordani, U.G. & Delhal, J. 1979. A evolução geocronológica da cordilheira do Espinhaço; dados novos e integração. Revista Brasileira de Geociências, 9: 71 85.
- Oehler, D.Z. & Sternberg, B.K. 1984. Seepage-induced anomalies, "false" anomalies, and implications for eletrical prospecting. AAPG, 68(9):1121-1245.
- Ojeda, H.A.O. 1985. Bacia do Bambuí: considerações geológicas, possibilidades petrolíferas e sugestão exploratória. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS/DEPEX.

- Oliveira, A.A.B.; Pitthan, I.H.L. & Garcia, M.G.L. 1977. Folha SB.19 Juruá II Geomorfologia. Projeto RADAMBRASIL, MME-DNPM, v.15, p.91-142.
- Oliveira, M.A.M. 1962. Reconhecimento geológico na parte sul da Bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Rio de Janeiro. Relatório Interno nº 206. PETROBRAS.
- Oliveira, J.R.P. 1989. Comportamento Estrutural dos Sedimentos dos Grupos Macaúbas e Bambuí Numa Porção Centro-Norte do Estado de Minas Gerais. Ouro Preto. 128p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de geologia - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto).
- Oliveira, C.;Velloso, A.C.X. & Leal, J.R. 1993. Processos Redox em Glei Húmico do Estado Rio de Janeiro: I. Variações Eletroquímicas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 17(1):17:22.
- Ortu, J.C. 1990. Modelagem Tectono-geofísica da Porção Sul da Bacia do São Francisco, Minas Gerais. Ouro Preto. 149p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia -Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto).
- Paradella, W.R. 1990. Introdução ao Processamento Digital de Imagens de Sensores Remotos Aplicados à Geologia. São José dos Campos, Instituto de Pesquisas Espaciais.
- Patton, K.H. & Manwaring, M.S. 1984. Evaluation of Landsat derived tonal anomaly for hydrocarbon microseepage, southwest Kansas. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 3, Colorado Springs, 1984. Proceedings...Colorado Springs (USA), ERIM. V.1, P.441-450.
- Pflug, R. & Renger, F. 1973. Estratigrafia e evolução geológica da margem SE do Cráton Sanfranciscano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracaju, 1973. Anais...Aracaju, SBG. V.2, P.5-19.
- Piazza, H.D. & Szatmari, P. 1977. Projeto Bambuí estratigrafia e tectônica regional da Bacia do São Francisco. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS.
- Pinho, J.M.M.; Dardenne, M.A. & Rigobello, A.E. 1989. Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 5, Belo Horizonte, 1989. Anais...Belo Horizonte, SBG/NMG. P.275-276.

- Ponsoni, F.J.; Filho, R.F.; Shimabukuro, Y.E.; Oliveira, W.J.; Gama, F.F. & Lee, D.C.L. 1996. Coleta de dados radiométricos e biométricos e estimativas de índice de área foliar em florestas implantadas de Eucalyptus ssp. em Cachoeira do Manteiga (MG). Comunicação interna do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - São José dos Campos. INPE-5973-NTC/326. 17p.
- Prade, G.O. 1970. Ocorrência de gás em Montalvânia, Minas Gerais. Rio de Janeiro. Relatório Interno nº 3756.PETROBRAS.
- Raij, B. V.; Quaggio, J.A.; Cantarella, H.; Ferreira, M.E.; Lopes, A.S. & Bataglia, O.C. 1987.Análise Química do Solo Para Fins de Fertilidade. Campinas, Fundação Cargill. 170p.
- Ratledge, C. 1984. Journal Am. Chemistry Society, 61:447.
- Reddy, C.N. & Patrick, W.H. 1977. Effect of Redox Potencial and Ph on the Uptake of Cadmium and Lead by Rice Plants. Journal of Environmental Quality, 6(3):259-262.
- Reid, N.; Iwashita, A.; Yamashita, Y. & Thompson, K. 1988. High resolution imaging of geobotanical anomalies associated with sub-surface hydrocarbons. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 6, Huston (USA), 1988. Proceedings...Huston, ERIM. V.1, P.213-223.
- Renger, F. 1973. A geologia do pré-cambriano no Norte da Bahia Oeste de Sergipe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracajú, 1973. Anais...Aracaju, SBG. V.2, P.151-156.
- Rezende, W.M.; Mello, M.R. & Bettini, C. 1980. Detecção de hidrocarboneto por prospecção geoquímica terrestre (Projeto Experimental). In: Anais do 31th CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camboriú, 1980. Anais...Camboriú, SBG. V.1, P.431-443.
- Rimann, E. 1917. A Kimberlita no Brasil. Anais da Escola de Minas de Ouro Preto, 15:27-32.
- Roberts, D.A. 1986. Discrimination of Vegetation Anomalies Associated with Hydrocarbon Microsseps Using Multi-Date Image Subtraction, Railroad Valley, Nevada. Stanford.
 133p. (Thesis of Master Science Submitted to Department of Applied Earth Science and the Committee on Graduate Studies of Stanford University).

- Robinove, C.J. 1982. Computation with physical values from Landsat digital data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(5):781-784.
- Rock, B.N. 1984. Remote detection of geobotanical anomalies associated with hydrocarbon microseepage. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 3, Colorado Springs (USA), 1984. Proceedings...Colorado Springs, ERIM. V.1, P.183-195.
- Rosa, R. 1992. Introdução ao Sensoriamento Remoto. 2 ed. Uberlândia, Editora da Universidade Federal de Uberlândia. 110p.
- Rowan, L.C. 1972. Near infrared iron absorption bands: application to geological mapping and mineral exploration. 4th Annual Earth Resources Program Review, Houston, Texas, p.60-1 a 60-18.
- Rowan, L.C.; Wetlaufer, P.H.; Goetz, A.F.H.; Billingsley, F.C. & Stewart, J.H. 1974.
 Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in Southcentral Nevada by use of computer enhanced ERTS images. U.S.G.S. Prof. Paper 883, 35 p.
- Rowan, L.C. Goetz, A.F.H. & Ashley, R.P. 1977. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. Geophysics, 42, 522-535.
- Sabins, F.F., 1987. Remote Sensing:Principles and Interpretation. New York, W.H. Freeman & Co.. 449 p.
- Santos, R.C.R.; Babinski, N.A.; Oliveira, W.J.; Silva, G.P.; Almeida, M.F.B.; Martins, M.L.; Gonçalves, R.C.S.; Galaxe, R.D. & Borges, V.L. 1996. Prospecção geoquímica de superfície (microbiologia de petróleo). Estudo experimental com amostras de solo da área do Remanso do Fogo, Bacia do São Francisco. Rio de Janeiro. Comunicação Técnica. PETROBRAS/CENPES/SEGEQ 64/96. 13p.
- Sarruge, J.R. & Haag, H.P. 1974. Análise Química em Plantas. Piracicaba, Esalq. 56p.
- Scholl, W.U. 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto, 1976. Anais...Ouro Preto, SBG. V.2, P.207-231.

- Schowengerdt, R.A. 1983. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. New York, Academic Press. 249p.
- Shaw, A.B. 1964. Time in Stratigraphy. New York, Mc Graw Hill. 365p.
- Silva, M.E. 1987. O Sistema de Dobramento Rio Preto e suas Relações com o Cráton do São Francisco. São Paulo. 141p. (Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- Silva, M.E.; Karmann, I. & Trompette, R. 1987. Litoestratigrafia do Supergrupo Espinhaço e Grupo Bambuí no Noroeste do Estado da Bahia. Revista Brasileira de. Geociências, 19:141-152.
- Simões, L.S.A. & Valeriano, C.M. 1990. Porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília: estágio atual do conhecimento e problemas de correlação tectonoestratigráfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, 1990. Boletim de resumos...Natal, SBG. P.289.
- Simonetti, C. 1994. Paleobiologia de Sedimentos Proterozóicos da Porção Setentrional da Bacia Sedimentar do São Francisco. São Paulo. 136p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- Simpson, C.J.; Wilford, J.R.; Macias, L.F. & Korsch, R.J. 1989. Satellite detectetion of natural hydrocabon seepage: Palm Valley Gas Field, Amadeus Basin, Central Australia. APEA Journal, p.196-211.
- Simpson, C.J.; Wilsford, J.R.; Macias, L.F. & Korsch, R.J. 1991. Remote sensing of petroleum gas seepage alteration - Palm Valley Gas Field, Amadeus Basin, Central Australia. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 8, Denver (USA), 1991. Proceedings...Denver, ERIM. V.2, P.1463-1472.
- Sohngen, N.L. 1906. Uber bakterien, welche methan als Kohlenstoffnahrung Energiequelle gebrauchen. Zentr. Bakt. Parasitenk, Abt. II, 15:513-517.
- Sommer, F.W. 1971. Microfósseis do calcário Bambuí de Pedro Leopoldo MG. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 43(1);135-139.

- Spix, J.B. & Martius, C.F.P. 1916. Reise in brasilien in 1817 bis 1820 gemacht und beschriebew. Atlas in folio gedruckt Bei M. Lindaner, Munchen. Através da Bahia. excertos da obra Reise in Brasilien. Salvador, Imprensa Official do Estado da Bahia. 1823/1831.230p.
- Srivastava, N.K. 1982. Algumas observações sobre os estromatólitos dos Grupos Una (Bahia) e Vaza Barris (Sergipe), Nordeste do Brasil. Ciências da Terra, 3:7-11.
- Steffen, C.A.; Gama, F.F. & Novo, E.M.L.M. 1993. Teste operacional do Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado - SADA. O experimento Barra Bonita. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, Curitiba, 1993. Anais...Curitiba, INPE. V.3, P.129-137.
- Stone, R.W.; White, A.G.C. & Fenske, M.R. 1940. Microorganisms attacking petroleum and oil fractions. Journal Bacteriol., 39:91-92.
- Stone, R.W.; Frenske, M.R. & Write, A.G.C. 1942. Bacteria attacking petroleum and oil fractions. Journal Bacteriol., 44:169-178.
- Taranik, J.V. 1978. Principles of computer processing of LANDSAT for geological applications. Washington, USGS (Open file report 78-117). 50p.
- Tausz, J. & Peter, M. 1919. New methode der kohlenwasserstoff analyses mit Hilfe von Bakterien. Zentr. Bakt. Parasintek., Abt. II, 49:497-554.
- Teixeira, L.B.; Martins, M. & Braun, P.G.B. 1993. Evolução geológica da Bacia do São Francisco com base em sísmica de reflexão e métodos potenciais. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador, 1993. Anais...Salvador. P.179-181.
- Tissot, B.P. & Welte, D.H. 1984. Petroleum Formation and Occurrence. Berlin, Springer-Verlag, 699 p.
- Tomasi, E. 1977. Geologia regional do Grupo Bambuí. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS.
- Uhlein, A.; Trompette, R. & Egydio da Silva, M. 1986. Estruturação tectônica do Supergrupo Espinhaço na região de Diamantina (MG). Revista Brasileira Geociências, 16:212-216.

- Uhlein, A. 1991. Transição Cráton-Faixa Dobrada: Um Exemplo do Cráton São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasiliano) no Estado de Minas Gerais. São Paulo. 295 p.(Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- Veloso, H.P. 1966. Atlas Florestal do Brasil. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Serviço de Informações. 82p.
- Veloso, H.P. & Goes Filho, L. 1982. Fitogeografia brasileira, classificação fisionômica ecológica da vegetação neotropical. Boletim Técnico Projeto RADAMBRASIL, Salvador nº 1. 80p.
- Veloso, H.P.; Rangel Filho, A.L.L.R. & Lima, J.C.A. 1991. Classificação da Vegetação Brasileira, Adaptada a um Sistema Universal. Rio de Janeiro, IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 124p.

Walter, J.D. & Coony, J.J. 1973. Journal Bacteriol., 115:635.

Zalán, P.V. 1985. Ocorrências de hidrocarbonetos em rochas sedimentares proterozóicas proposta de pesquisa para a Bacia Bambuí. Rio de Janeiro. Relatório Interno. PETROBRAS/DEPEX/SEBINT.