



AUTORES AUTHORS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS	AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
	ESPECTRORRADIOMETRIA CORRELACIONAMENTO LITOESTRATIGRÁFICO SENSORIAMENTO REMOTO	<i>Ralf Gielow</i> Ralf Gielow Pres. Cons. Pós-Graduação

AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR	DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION	REVISADA POR / REVISED BY
<i>Lênio Soares Galvão</i> Lênio Soares Galvão	<input type="checkbox"/> INTERNA / INTERNAL <input checked="" type="checkbox"/> EXTERNA / EXTERNAL <input type="checkbox"/> RESTRITA / RESTRICTED	<i>Ícaro Vitorello</i> Ícaro Vitorello

CDU/UDC	DATA / DATE
528.711.7:665.6	Dezembro 1989

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO	ORIGEM ORIGIN PG/DGE
	INPE-5022-TDL/402	PROJETO PROJECT SER
AUTORES/AUTHORSHIP	CORRELACIONAMENTO LITOESTRATIGRÁFICO ESPECTRAL DE POÇOS DE PERFURAÇÃO	Nº DE PAG. NO OF PAGES
	Lênio Soares Galvão	ULTIMA PAG. LAST PAGE
		VERSÃO VERSION
		Nº DE MAPAS NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Estudou-se a utilização de medidas espectrorradiométricas (400 a 1000 nm) para o correlacionamento litoestratigráfico de poços de perfuração da Bacia do Parnaíba (PI-MA), através de uma abordagem quantitativa e qualitativa envolvendo a aplicação seqüencial das seguintes técnicas estatísticas: Análise de Agrupamentos, Análise Fatorial, Análise Discriminante Linear e Correlação-Cruzada. Investigou-se também a influência da composição química e do intemperismo sobre a resposta espectral das unidades estratigráficas presentes nos poços. Os resultados obtidos levam às seguintes conclusões: a) o correlacionamento litoestratigráfico espectral de poços pode ser feito com sucesso, usando a Distância Generalizada de Mahalanobis, obtida a partir de funções discriminantes, como medida de similaridade dos grupos litológicos; b) a discriminação espectral dos litotipos da Bacia do Parnaíba é influenciada em grande parte pelos constituintes menores das rochas, principalmente ferro e matéria orgânica; c) a ação do intemperismo reduz a reflectância das litologias, embora não se saiba se ela afeta de forma significativa a separabilidade espectral dos grupos de rochas com relação a uma classe correspondente contendo material rochoso menos intemperizado.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, aprovada em novembro de 1989.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Paulo Roberto Meneses



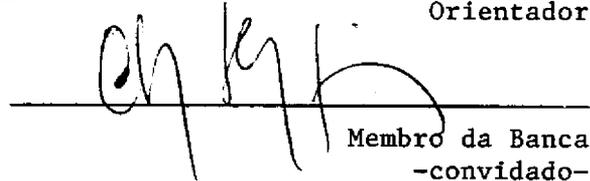
Presidente
~~-Convidado-~~

Dr. Ícaro Vitorello



Orientador

Dr. Chang, Hung Kiang



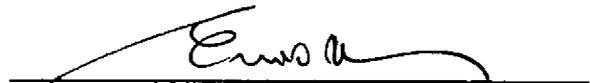
Membro da Banca
~~-convidado-~~

Dr. José Carlos Neves Epiphânio



Membro da Banca

Dr. Enio Bueno Pereira



Membro da Banca

Candidato: Lênio Soares Galvão

São José dos Campos, 10 de novembro de 1989

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, especialmente ao Dr. Ícaro Vitorello, pela dedicação e empenho na resolução dos problemas defrontados ao longo do trabalho.

À Petrobrás S.A., financiadora dos recursos para a execução desta pesquisa, e em especial ao geólogo Francisco Mota Bezerra da Cunha, que supervisionou o trabalho por parte desta empresa.

Aos geólogos Henrique Piazza e Adson da Petrobrás, que juntamente com o geólogo Francisco Bezerra, auxiliaram-me nas atividades de campo.

Ao professor Vicente Alonso Perdiz do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), pela confecção dos programas de computador para adquirir dados e gerar diversos tipos de curvas espectrais.

Às geólogas Ana Maria e Tikae do Cenpes/Petrobrás pela descrição das seções delgadas e determinação da percentagem de carbono orgânico das amostras, respectivamente.

Aos Drs. Antônio Roberto Formaggio e José Carlos Neves de Epiphânio pelas sugestões dadas durante a elaboração do trabalho.

Ao Dr. Jesus Marden dos Santos e ao Secretário da Pós-Graduação Adélio Gurgel do Amaral, pelo apoio na resolução dos problemas existentes no INPE para o repasse dos recursos financeiros da Petrobrás.

Aos colegas pós-graduandos de turma pelo apoio e colaboração em algumas atividades e à meteorologista Rita de Cássia de Cerqueira pelo auxílio na confecção de algumas ilustrações.

Aos professores Rinaldo e Adilson do IME/USP pela atenção dedicada na resolução de algumas questões estatísticas.

Aos funcionários da biblioteca do INPE, pelo atendimento exemplar ao longo destes três anos.

Quero externar meus agradecimentos às diversas pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta pesquisa.

ABSTRACT

The use of spectral radiometry (from 400 to 1000 nm) for lithostratigraphic correlation of rock samples from Parnaíba Basin (Piauí and Maranhão States) boreholes were studied from a quantitative and qualitative standpoint. The former involves the application of the following statistical techniques: Cluster Analysis, Factor Analysis, Linear Discriminant Functions and Cross-Correlations. The effects of chemical composition and of weathering upon the spectral response from stratigraphic units were also investigated. The results indicate the following conclusions: a) lithostratigraphic correlation between boreholes was successfully done with the use of Mahalanobis' Distance Tests, based on Discriminant Functions as a measure of similarity among lithological samples; b) the spectral discrimination of Parnaíba Basin lithological units was greatly affected by minor rock components, mainly iron and organic matter; c) the weathering processes reduce the reflectance values of rock samples, even though it is not known if they significantly affect the spectral separation of rock groups in comparison with the separation of fresh rock material.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xv
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 2 - ÁREA DE ESTUDO.....</u>	<u>7</u>
2.1 - Caracterização geológica da Bacia do Parnaíba.....	8
2.1.1 - Unidades pré-silurianas.....	13
2.1.2 - Seqüência silurodevoniana (Paleozóico).....	15
2.1.2.1 - Grupo Serra Grande.....	15
2.1.2.2 - Grupo Canindé.....	16
2.1.3 - Seqüência permocarbonífera (Paleozóico).....	18
2.1.4 - A seqüência superior Mesocenozóica.....	21
<u>CAPÍTULO 3 - O COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS ROCHAS SEDIMENTARES (400</u> <u>A 2500 nm).....</u>	<u>23</u>
3.1 - Mecanismos de interação da energia radiante com a superfície dos alvos.....	26
3.1.1 - Interação a nível macroscópico	26
3.1.2 - Interação a nível microscópico.....	28
3.2 - A origem das feições espectrais diagnósticas de minerais e rochas.....	30
3.2.1 - Processos eletrônicos.....	30
3.2.2 - Processos vibracionais.....	32
3.3 - Feições espectrais representativas dos principais grupos de rochas sedimentares.....	34
<u>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE TRABALHO.....</u>	<u>39</u>
4.1 - O correlacionamento estratigráfico espectral entre poços de perfuração.....	39
4.2 - A influência da composição química na resposta espectral das rochas da Bacia do Parnaíba.....	41
4.3 - A influência do intemperismo na reflectância espectral das unidades estratigráficas da Bacia do Parnaíba.....	42

<u>CAPÍTULO 5 - O CORRELACIONAMENTO LITOESTRATIGRÁFICO ESPECTRAL DE POÇOS DE PERFURAÇÃO.....</u>	43
5.1 - Seleção dos poços e coleta das amostras.....	43
5.2 - A obtenção do fator de reflectância bidirecional (FRB).....	43
5.3 - Avaliação quantitativa dos dados.....	51
5.3.1 - Aquisição das variáveis para análise.....	51
5.3.2 - A definição de grupos de amostras em cada poço.....	55
5.3.3 - A redução da dimensionalidade dos dados.....	65
5.3.4 - A discriminação espectral dos grupos de rochas.....	76
5.3.5 - O ajuste geométrico entre as colunas de dados espectrais.	93
5.4 - Avaliação qualitativa.....	95
<u>CAPÍTULO 6 - A INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA RESPOSTA ESPECTRAL DAS ROCHAS DA BACIA DO PARNAÍBA.....</u>	99
6.1 - Os resultados obtidos.....	100
6.2 - A resposta espectral das amostras pulverizadas.....	111
<u>CAPÍTULO 7 - A INFLUÊNCIA DO INTEMPERISMO NA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DAS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DA BACIA DO PARNAÍBA.....</u>	115
<u>CAPÍTULO 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</u>	125
<u>CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES.....</u>	129
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	131
APÊNDICE A - ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS	
APÊNDICE B - ANÁLISE FATORIAL (TIPO R OU MÉTODO FATOR-PRINCIPAL)	
APÊNDICE C - ANÁLISE FUNÇÃO DISCRIMINANTE	
APÊNDICE D - CORRELAÇÃO-CRUZADA	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - A Bacia do Parnaíba e as demais bacias Fanerozóicas.....	7
2.2 - Localização da Bacia intracratônica do Parnaíba dentro do contexto geológico regional.....	10
2.3 - Síntese da geologia da Bacia do Parnaíba nos Estados do Piauí e Maranhão.....	11
2.4 - Coluna estratigráfica da Bacia do Parnaíba.....	12
2.5 - Quadro comparativo de algumas colunas estratigráficas propostas para parte da seção paleozóica da Bacia do Parnaíba..	14
3.1 - A influência das macro e micro variações da topografia nas condições de iluminação de sua superfície.....	28
3.2 - Curvas de reflectância obtidas a partir de amostras moídas de calcários.....	35
3.3 - Curvas de reflectância espectral obtidas a partir de amostras moídas de arenitos.....	36
3.4 - Curvas de reflectância espectral obtidas a partir de amostras moídas de folhelhos.....	37
4.1 - Metodologia de trabalho adotada para o correlacionamento estratigráfico espectral de poços de perfuração.....	40
5.1 - Localização dos poços Testa Branca (TB), Mangabeiras (MS), Barão de Grajaú (BG) e Floriano (FL).....	44
5.2 - Unidades litoestratigráficas perfuradas pelos poços Mangabeiras (MS), Testa Branca (TB), Floriano (FL) e Barão do Grajaú (BG).....	45
5.3 - A obtenção dos dados de reflectância espectral de amostras de rochas com o espectrorradiômetro "Optronic".....	46
5.4 - Efeito da vizinhança do alvo em função da distância do sensor ao plano das placas.....	50
5.5 - Curva de reflectância espectral obtida com o Opstronic 740A e espectro derivativo correspondente com valores normalizados.	54
5.6 - Projeção dos escores sobre os dois primeiros eixos principais componentes para as 19 amostras do poço Testa Branca.....	56
5.7 - Dendograma para as 19 amostras do poço Testa Branca resultante da aplicação da Análise de Agrupamentos ("Group Average").....	57
5.8 - Curvas de reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Testa Branca.....	61

5.9 - Curvas de reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Mangabeiras.....	64
5.10 - Curvas de reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Barão de Grajaú.....	67
5.11 - Curvas de reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Floriano.....	70
5.12 - Separabilidade espectral entre grupos litológicos dos Poços Barão de Grajaú e Testa Branca, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis normalizada (D^2).....	88
5.13 - Separabilidade espectral entre grupos litológicos dos Poços Testa Branca e Mangabeiras, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis (D^2).....	89
5.14 - Correlacionamento estratigráfico espectral entre grupos litológicos pertencentes aos poços Testa Branca e Mangabeiras, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis normalizada (D^2).....	90
5.15 - Correlacionamento estratigráfico espectral entre grupos litológicos pertencentes aos poços Testa Branca e Mangabeiras, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis normalizada (D^2).....	92
5.16 - Correlação-cruzada entre os Poços Testa Branca (TB) e Mangabeiras (MS), obtida a partir da variável 35 (razão 9/5)..	94
5.17 - Variabilidade de algumas variáveis espectrais selecionadas pela avaliação quantitativa dos dados.....	97
6.1 - Correlação da composição química e granulometria de 27 amostras de arenitos e folhelhos com valores médios de reflectância de bandas estreitas (10 nm de largura).....	101
6.2 - Matriz de correlação para as variáveis independentes, obtida a partir de 27 amostras de arenitos e.....	102
6.3 - Correlação da composição química e granulometria de 16 amostras de arenitos com valores médios de reflectância de bandas estreitas (10 nm de largura).....	104
6.4 - Correlação da composição química de 11 amostras de folhelhos com valores médios de reflectância de bandas estreitas (10 nm de largura).....	105
6.5 - Mapa de contorno do coeficiente de correlação entre a variável V3 (Al_2O_3) e razões de reflectância (400 a 1000 nm)...	106
6.6 - Mapa de contorno do coeficiente de correlação entre a variável V6 (Fe_2O_3) e razões de reflectância (400 a 1000 nm)..	107
6.7 - Curvas de reflectância espectral para amostras de rochas da Bacia do Parnaíba.....	109
6.8 - Curvas de reflectância espectral obtidas sobre amostras inteiras e sobre o material pulverizado correspondente de (a) arenitos e (b) folhelhos.....	112

7.1 - Reflectância obtida em laboratório a partir das faces de uma amostra de arenito argiloso da Formação Cabeças.....	117
7.2 - Disjunções poligonais típicas dos arenitos da porção superiores da Formação Cabeças.....	118
7.3 - Reflectância obtida em laboratório a partir das faces de uma amostra de arenito quartzoso da Formação Poti.....	119
7.4 - Afloramento constituído por arenitos quartzosos da Formação Poti, situado a aproximadamente 40 km de Floriano (PI) em direção a Amarante (PI).....	120
7.5 - Reflectância obtida em laboratório a partir das faces de uma amostra de folhelho da Formação Longá.....	121
7.6 - Reflectância obtida em laboratório a partir de uma amostra siltito avermelhado (Formação Motuca) e de debris adjacentes ao afloramento.....	122
7.7 - Afloramento em corte de estrada constituído por folhelhos roxos com níveis e concreções silicosas da porção basal da Formação Pedra de Fogo.....	123
7.8 - Pavimento do afloramento em corte de estrada mostrado na Fig. 7.7, constituído por uma mistura de folhelho e concreções silicosas.....	123
7.9 - Reflectância obtida em laboratório a partir de uma amostra de folhelho roxo com concreções silicosas (Formação Pedra de Fogo).....	124
8.1 - Potencialidades da utilização de dados de reflectância (400-2500 nm) para o correlacionamento estratigráfico de poços...	126

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Sumário dos aspectos fisiográficos simplificados associados às porções leste, central e oeste da Bacia do Parnaíba.....	9
5.1 - Variáveis escolhidas para análise quantitativa.....	52
5.2 - Resumo das análises petrográficas e difração de raio-x dos litotipos do poço Testa Branca.....	59
5.3 - Composição química e conteúdo de carbono orgânico total (COT) para os grupos litológicos do poço Testa Branca.....	60
5.4 - Resumo das análises petrográficas e difração de raio-x dos litotipos do poço Mangabeiras.....	62
5.5 - Composição química e conteúdo de carbono orgânico total (C. O.T.) para os grupos litológicos do poço Mangabeiras.....	63
5.6 - Resumo das análises petrográficas e difração de raio-x dos litotipos do poço Barão de Grajaú.....	65
5.7 - Composição química e conteúdo de carbono orgânico total (C. O.T.) para os grupos litológicos do poço Barão de Grajaú....	66
5.8 - Resumo das análises petrográficas e difração de raio-x dos litotipos do poço Floriano.....	68
5.9 - Composição química e conteúdo de carbono orgânico total (C. O.T.) para os grupos litológicos do poço Floriano.....	69
5.10 - Os 8 primeiros autovalores e % variância associada.....	72
5.11 - Matriz fatorial rotacionada pelo critério Varimax.....	73
5.12 - Seleção dos subconjunto de 20 variáveis a partir da Análise Fatorial (método principal-fator).....	77
5.13 - Matriz de classificação obtida a partir de uma análise discriminante envolvendo 12 variáveis espectrais.....	81
5.14 - Matriz de classificação obtida a partir de uma análise discriminante sobre 9 variáveis simulando dados TM (Landsat-5) (400 a 1000 nm).....	83
5.15 - Estatística multivariada e aproximações F.....	85
5.16 - Sumário das medidas de separabilidade entre pares de grupos utilizando a Distância Generalizada em Mahalanobis.....	87
5.17 - Ordenação das 12 melhores variáveis espectrais, baseada na análise discriminante linear, para a discriminação litológica entre os poços de perfuração.....	96

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos no estudo de qualquer bacia sedimentar é a identificação de sua correta seqüência litoestratigráfica e a caracterização de sua evolução tectonossedimentar. Dados de sensoriamento remoto são aplicáveis a este objetivo, podendo fornecer informações detalhadas em várias áreas, incluindo a identificação e correlação de fácies para a interpretação de ambientes deposicionais e o estabelecimento das relações entre feições estruturais e modelos de sedimentação (Marrs, 1985). Dados de sensoriamento remoto constituem fontes independentes e às vezes únicas de informações litológicas e estruturais, essenciais à compreensão de sua evolução tectonossedimentar (Bailey, 1985; Paylor, 1985). Unidades litoestratigráficas não reconhecidas por técnicas convencionais de mapeamento de campo, podem às vezes ser definidas e mapeadas mesmo em terrenos com solos residuais e alguma cobertura vegetal (Lang e Baird, 1981). A integração destes dados com outros dados relevantes (topográficos, geofísicos, geoquímicos) tende a otimizar todo o processo de extração das informações em seu verdadeiro potencial.

A evolução dos sistemas sensores e sua aplicação no estudo de bacias sedimentares têm se dado de forma dinâmica. Mais de 50 anos de experiência com o uso de fotografias aéreas estabeleceram o sensoriamento remoto como uma ferramenta de mapeamento geológico. Fotografias aéreas estereoscópicas constituem de fato uma boa fonte de informação estrutural e estratigráfica, sendo muito importantes em programas de exploração de bacias sedimentares (Miller e Miller, 1961).

A partir do lançamento do primeiro satélite da série Landsat em 1972 e com o conseqüente desenvolvimento dos sistemas de processamento digital de dados, imagens puderam ser melhor obtidas com dados espectrais fora da faixa de sensibilidade da visão humana ou filme fotográfico, facilitando o processo de fotointerpretação geológica.

Aplicações prévias destes dados em bacias sedimentares concentraram-se sobre estudos regionais, tais como análise de lineamentos, delimitação de anomalias (cor, vegetação, topografia), detecção de áreas de mineralização e mapeamento estrutural e estratigráfico de reconhecimento (Paylor, 1985). Por outro lado, a inadequada resolução espacial e espectral de sensores como o "Multispectral Scanner" (MSS/Landsat) limitou a utilização das imagens multiespectrais para estudos geológicos mais detalhados nas bacias (Lang et al., 1985).

Assim, por volta de 1980, menos de 10 anos após o lançamento do Landsat-1, estava claro que sensores com melhores resoluções do que o MSS facilitariam o uso de dados multiespectrais para a discriminação litológica. Estas melhorias foram obtidas em grande parte, a partir de 1982, com a disponibilidade do sensor "Thematic Mapper" (TM/Landsat 5) e, posteriormente em 1986, do "High Resolution Visible" (HRV/SPOT), embora as especificações técnicas destes sensores sejam ainda insuficientes para diagnosticar algumas importantes informações físicas e químicas dos materiais e, por conseguinte, o seu perfeito comportamento espectral.

Existe uma considerável quantidade de informação entre 400 e 2500 nm, acerca dos alvos geológicos, que apenas pode ser adquirida com o uso de sensores de melhor resolução espacial e espectral. Dentro deste contexto, surgiu a "espectrometria imageadora", a nova tendência do sensoriamento remoto. Esta técnica compreende a aquisição simultânea de imagens em bandas espectrais muito estreitas e contíguas nas porções visível e infravermelho refletido, de tal modo que um espectro contínuo de reflectância possa ser reconstituído para cada pixel da cena (Vane e Goetz, 1985; Abrams, 1986). Baseado no fato de que muitos minerais ricos em Fe^{+2} , Fe^{+3} , OH^- , CO_3^{-2} e SO_4^{-2} têm características espectrais únicas entre 400 e 2500 nm, torna-se possível a sua identificação direta na superfície da Terra e/ou de suas feições espectrais diagnósticas. A próxima geração de satélites incorporará alguns destes novos sensores, a exemplo dos programas Landsat (Lansing Júnior, 1987) e "Earth Observing System" (EOS) (NASA, 1987).

Interessantes perspectivas surgem, então, para o estudo de bacias sedimentares. Mapas mineralógicos mostrando a distribuição de minerais argilosos ou outros, importantes na prospecção de petróleo, poderão ser compilados de imagens de alta resolução espectral. A distinção entre calcários e dolomitos, que frequentemente requer um teste químico no campo, poderá ser obtida remotamente através da observação de pequenos deslocamentos na banda de absorção carbonática em torno de 2300 nm. Importantes depósitos sedimentares com feições espectrais diagnósticas, tais como gipso e muitos minerais evaporíticos, poderão ser melhor delineados.

O artigo de Lang et al. (1987) é um dos melhores exemplos que caracterizam o estado-da-arte do sensoriamento remoto multiespectral no estudo de bacias sedimentares. Eles desenvolveram uma metodologia de trabalho que lança mão, inclusive, dos novos sistemas aerotransportáveis de alta resolução espectral, para caracterização estrutural e estratigráfica de áreas pertencentes às Bacias Wind River e Big Horn (Wyoming, EUA). A caracterização da atitude, espessura e litologia dos estratos foi possível, bem como a construção de colunas estratigráficas baseadas em dados espectrais, pelo menos para áreas de rochas expostas e com pouca cobertura vegetal.

Toda esta discussão realça um ponto extremamente importante no sensoriamento remoto: a necessidade de medidas espectroscópicas de campo ou laboratório. Destas medidas dependerá o grau de confiabilidade das informações obtidas a partir de imagens multiespectrais. A quantidade e qualidade das informações dependerá essencialmente do perfeito conhecimento do processo pelo qual as características do fenômeno ou evento geológico de interesse são transmitidas e registradas pelo sistema sensor. As medidas de campo, em relação às de laboratório, têm a conveniência de estarem mais próximas das reais condições em que foram obtidas as imagens. As de laboratório possibilitam um controle rígido das diversas variáveis que influenciam a obtenção dos dados (p. ex., condições de iluminação, efeitos atmosféricos, "background" do alvo em questão), propiciando uma melhor compreensão

da origem das feições espectrais diagnósticas de minerais e rochas ou das interações microscópicas da energia radiante com a superfície dos alvos. Se esta base espectroscópica já é importante na análise de produtos TM e HRV, ela se torna essencial para a próxima geração de sensores com alta resolução espacial e espectral.

No Brasil, poucos trabalhos têm utilizado medidas espectroscópicas como um dado auxiliar na análise de imagens e pouco se conhece sobre os padrões espectrais de nossos diferentes ambientes geológicos. Isto muitas vezes limitou a discussão dos trabalhos envolvendo discriminação litológica a um enfoque puramente descritivo. Desde que as condições de acentuada alteração de ambientes tropicais levam à formação de uma série de minerais e de modificações na aparência superficial das rochas, é provável que espectralmente eles se sobreponham aos espectros dos minerais primários. Como apontou Meneses (1986), nestas circunstâncias é bem possível encontrar diferenças significativas nas feições espectrais clássicas descritas nos trabalhos de Graham R. Hunt e coautores.

Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar o correlacionamento estratigráfico de poços de perfuração, através do estudo do comportamento da reflectância espectral (400 a 1000 nm) das amostras dos testemunhos de poços da Bacia do Parnaíba (PI-MA) e do relacionamento com seus materiais intemperizados encontrados em superfície. Procura-se, portanto, obter parâmetros para fundamentar a interpretação de imagens multiespectrais objetivando eventuais mapeamentos faciológicos na região. A possibilidade do desenvolvimento de tal abordagem para correlacionamento estratigráfico de poços de perfuração é particularmente interessante. Algumas vantagens são óbvias, pois sua utilização é rápida, de baixo custo financeiro e implica na não-destruição das amostras. Desta forma, poderá constituir uma importante fonte adicional de dados, principalmente, quando utilizada com outras fontes de informação, tais como dados de radiação gama e resistividade elétrica.

De forma mais específica, este trabalho tem os seguintes objetivos:

- (1) avaliar a separabilidade radiométrica espectral entre unidades estratigráficas existentes em poços de perfuração, através da análise quantitativa e qualitativa do Fator de Reflectância Bidirecional" (FRB) ou mais propriamente das seguintes variáveis:
 - a - o Fator de Reflectância Bidirecional compreendendo 11 bandas espectrais com 10 nm de largura ($FRB_{\Delta\lambda}$);
 - b - a razão entre as reflectâncias destas 11 bandas ($FRB_{\Delta\lambda_1} / FRB_{\Delta\lambda_2}$), não se considerando as permutações;
 - c - os dados obtidos a partir da primeira derivada dos espectros de reflectância ($dFRB/d\lambda$). Eles envolveram a aquisição do comprimento de onda equivalente ao ponto de inflexão das feições espectrais que aparecem tipicamente entre 600 e 800 nm;
- (2) verificar a influência da composição química na resposta espectral das rochas;
- (3) analisar a influência dos produtos de intemperismo sobre a reflectância espectral destas unidades estratigráficas.

O Capítulo 2 fornece uma síntese da geologia da Bacia do Parnaíba, área de estudo onde estão localizados os poços de perfuração. O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica do comportamento espectral das rochas sedimentares. O Capítulo 4 mostra a metodologia de trabalho adotada para alcançar os três objetivos acima descritos. Os objetivos (1), (2) e (3) são alvos da discussão dos Capítulos 5, 6 e 7, respectivamente.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para estudo compreende a Bacia intra-cratônica do Parnaíba, também conhecida como Bacia do Maranhão, principalmente em sua porção leste, onde predominam condições semi-áridas com boas exposições de rochas. A Bacia do Parnaíba possui cerca de 600.000 km² de área, abrangendo quase inteiramente os Estados do Piauí e Maranhão, além de partes adjacentes dos Estados de Goiás e Pará (Figura 2.1).



Fig. 2.1 - A Bacia do Parnaíba e as demais bacias Fanerozóicas.

FONTE: Caputo (1984).

Ela afigura-se no panorama geográfico brasileiro como uma vasta região geo-transicional, reunindo aspectos referentes ao

clima, relevo, vegetação e hidrografia, peculiares ao Nordeste, Centro-Oeste e Amazônia. Os limites entre as zonas de influência fisiográfica nem sempre são bem definidos.

A Tabela 2.1 reúne os principais aspectos referentes ao clima, vegetação e hidrografia da Bacia do Parnaíba. Quanto ao relevo, ele é sobretudo influenciado pela litologia predominante, cabendo aos fatores estruturais um papel secundário. Nas formações essencialmente arenosas desenvolvem-se extensos chapadões, limitados por escarpas muito entalhadas e com patamares sucessivos. Nas unidades predominantemente pelíticas desenvolve-se um relevo com áreas rebaixadas ou com planícies suavemente onduladas. Quando as intercalações areníticas ocorrem nas unidades pelíticas, mesetas de pequena altura e com múltiplos patamares podem ser observadas.

2.1 - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA BACIA DO PARNAÍBA

Dentro de um contexto geológico mais amplo, a Bacia do Parnaíba encontra-se instalada na porção ocidental da Plataforma Sul-Americana, posicionando-se entre as faixas de dobramentos que bordejam os Crátons de São Francisco, São Luís e Amazonas (Figura 2.2).

A Bacia do Parnaíba é sobretudo uma bacia Paleozóica, embora depósitos mesozóicos pouco espessos cubram grandes áreas. A sua espessura sedimentar atinge pouco mais de 3000 metros, dos quais cerca de 2700 metros são Paleozóicos.

Os sedimentos Paleozóicos, distribuídos principalmente ao longo do Estado do Piauí, são dominados por clásticos de origem continental, representados por arenitos, siltitos e folhelhos, definindo unidades litoestratigráficas amplas e uniformemente distribuídas com discretas variações faciológicas. Sedimentos clásticos continentais e extrusivas basálticas caracterizam a seqüência Mesoceno-zóica, aflorante predominantemente no Estado do Maranhão, cuja espessura mal atinge 500 metros (Figura 2.3).

TABELA 2.1

SUMÁRIO DOS ASPECTOS FISIOGRAFICOS SIMPLIFICADOS ASSOCIADOS ÀS PORÇÕES
LESTE, CENTRAL E OESTE DA BACIA DO PARNAÍBA

OESTE	CENTRAL	LESTE		
Equatorial	Tropical semi- úmido	Semi-árido quente	TIPO	CLIMA
2.500 mm (Período chuvoso: principalmente en- tre novembro e junho)	1200 mm (Período chuvoso: novembro a maio)	< 750 mm (Período chuvoso: novembro a abril)	PREC. MÉDIA ANUAL PLUV.	
27	28	28	TOC MÉDIA ANUAL	
Floresta Equato- rial (angelim, canela de velho, massaranduba, açaizeiros ma- mona)	Cerrado (faveira de bolota, tin- juí, mangabeira, capim-agreste, barbatimão, palmáceas diver- sas)	Caatinga (aroeira, anjico, jurema, xique-xique, man- dacaru, macambira, facheiro)	ASSOCIAÇÃO VEGETAL DOMINANTE	
Perenes (Rios Parnaíba, Itapecuru, Mearim, Grajaú, Pindaré, Gurupi, Capim e Tocantins)		Intermitentes a se- mi-perenes (Rios Longá, Poti, Piauí e Gurjéia)	HIDROGRA- FIA	

O preenchimento da bacia durante o Paleozóico estabeleceu-se através de três grandes ciclos sedimentares em consequência de movimentos tectônicos de estilo epirogenético (Mesner e Wooldridge, 1962). Dois ciclos de menor expressão caracterizam a deposição da sequência Mesoceno-zóica. Durante sua história deposicional não se verificaram deformações de qualquer natureza, a não ser as de caráter epirogenético ou perturbações locais originadas pelo vulcanismo. A Fi-

gura 2.4 ilustra a coluna litoestratigráfica da bacia, mostrando também os principais aspectos de sua evolução tectonossedimentar.

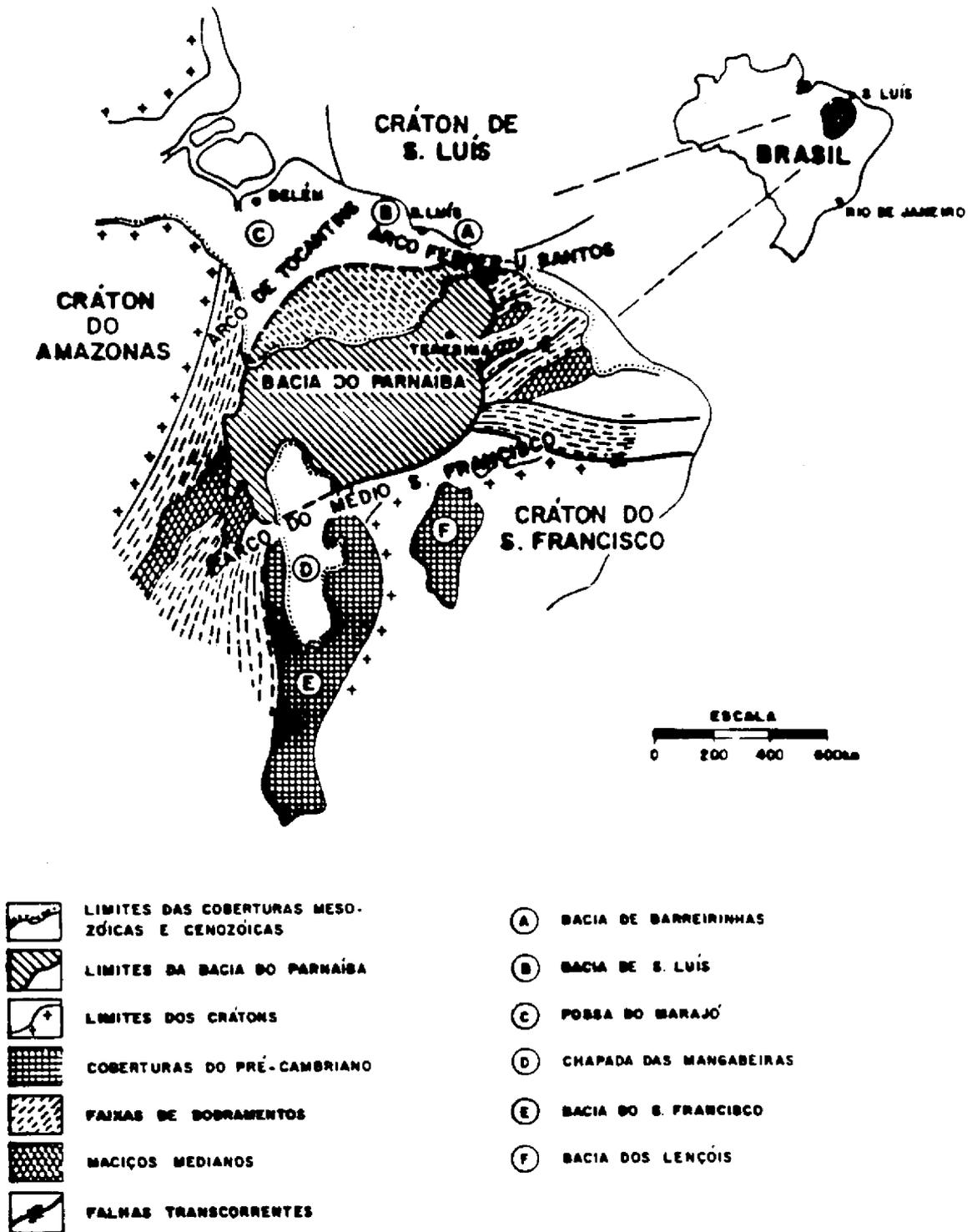


Fig. 2.2 - Localização da Bacia intracratônica do Parnaíba dentro do contexto geológico regional.

FONTE: Cunha (1986).

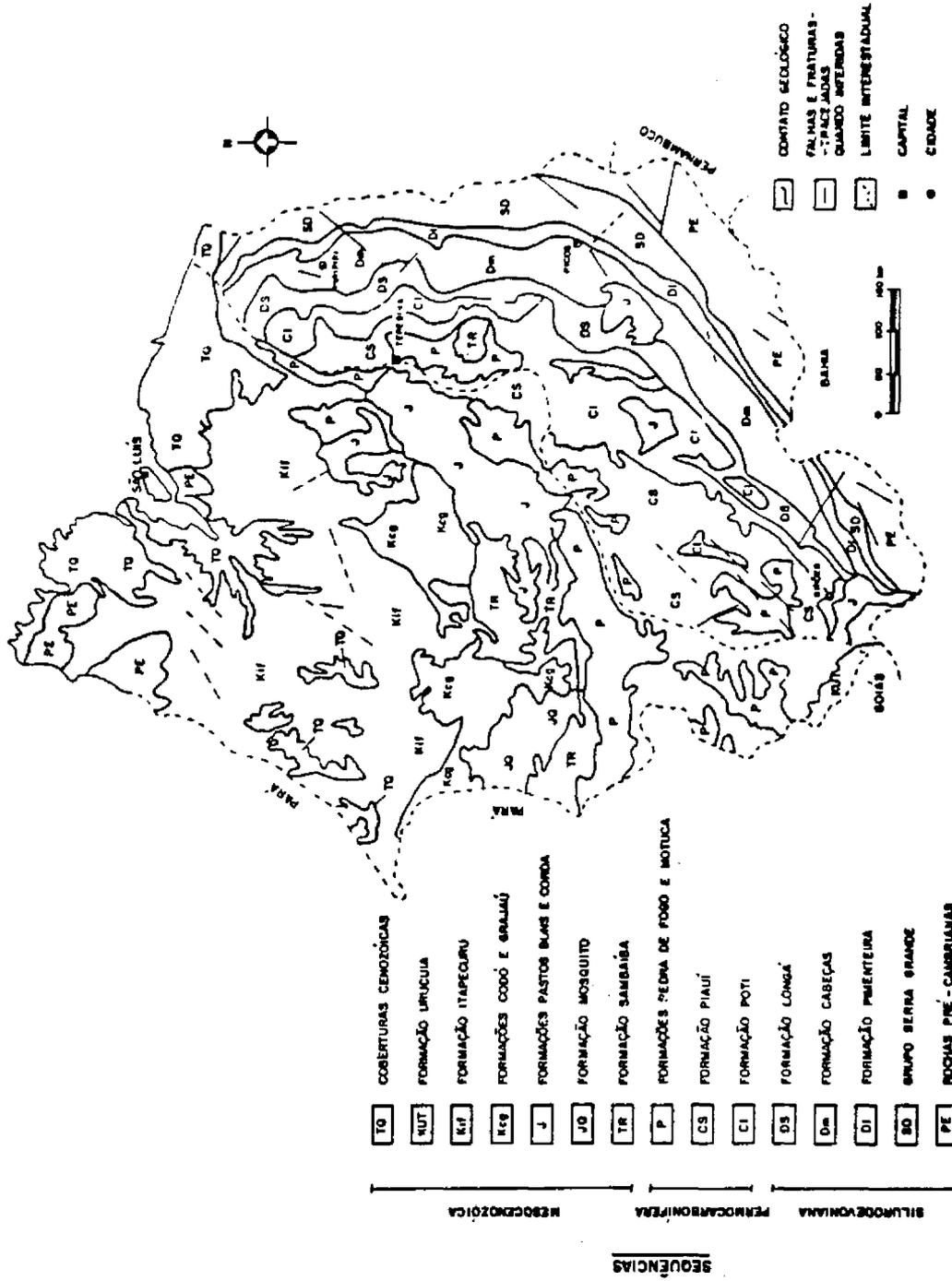


Fig. 2.3 - Síntese da geologia da Bacia do Parnaíba nos Estados do Piauí e Maranhão. FONTE: DNPM (1987).

A evolução tectonossedimentar da bacia, sob condições tectônicas relativamente estáveis, propiciou a deposição de uma coluna sedimentar simples e pouco espessa. Entretanto, o predomínio de uma seqüência arenosa e a conseqüente ausência de fósseis são os principais responsáveis pelas divergências cronológicas, quanto ao posicionamento e subdivisão estratigráfica de algumas de suas unidades (Cunha, 1986) (Figura 2.5).

Segundo Bahia (1982), a estratigrafia da Bacia do Parnaíba pode ser dividida em três seqüências: (1) a seqüência Siluro-devoniana com alternância de arenitos e folhelhos; (2) a seqüência intermediária Permocarbonífera com alternância de clásticos terrígenos e sedimentos de origem química, e (3) a seqüência superior com predomínio de clásticos terrígenos grosseiros. Ígneas intrusivas básicas de idade Mesozóica são frequentes em toda a seqüência estratigráfica da bacia. Extrusivas básicas de idade Jurotriássica e Cretácica estão presentes na seqüência superior.

2.1.1 - UNIDADES PRÉ-SILURIANAS

Compreendem sedimentos imaturos (arenitos arcossianos, siltos micáceos e grauvacas) pertencentes a Formação Mirador (Rodrigues, 1967), arenitos e calcários do Grupo Bambuí e rochas do embasamento cristalino (xistos, granitos, gnaisses), que ocorrem abaixo da seção Serra Grande em alguns poços da região sul-sudeste da bacia.

Contrariando as observações de Carozzi et al. (1975) e Quadros (1982), que incluíram a Formação Mirador como parte integrante da seção inferior do Grupo Serra Grande, Caputo e Lima (1984) atribuem uma idade Pré-Ordoviciano para a mesma, com base em dados palinológicos. Segundo estes últimos autores, a Formação Mirador pertence a um ciclo sedimentar anterior ao do Grupo Serra Grande.

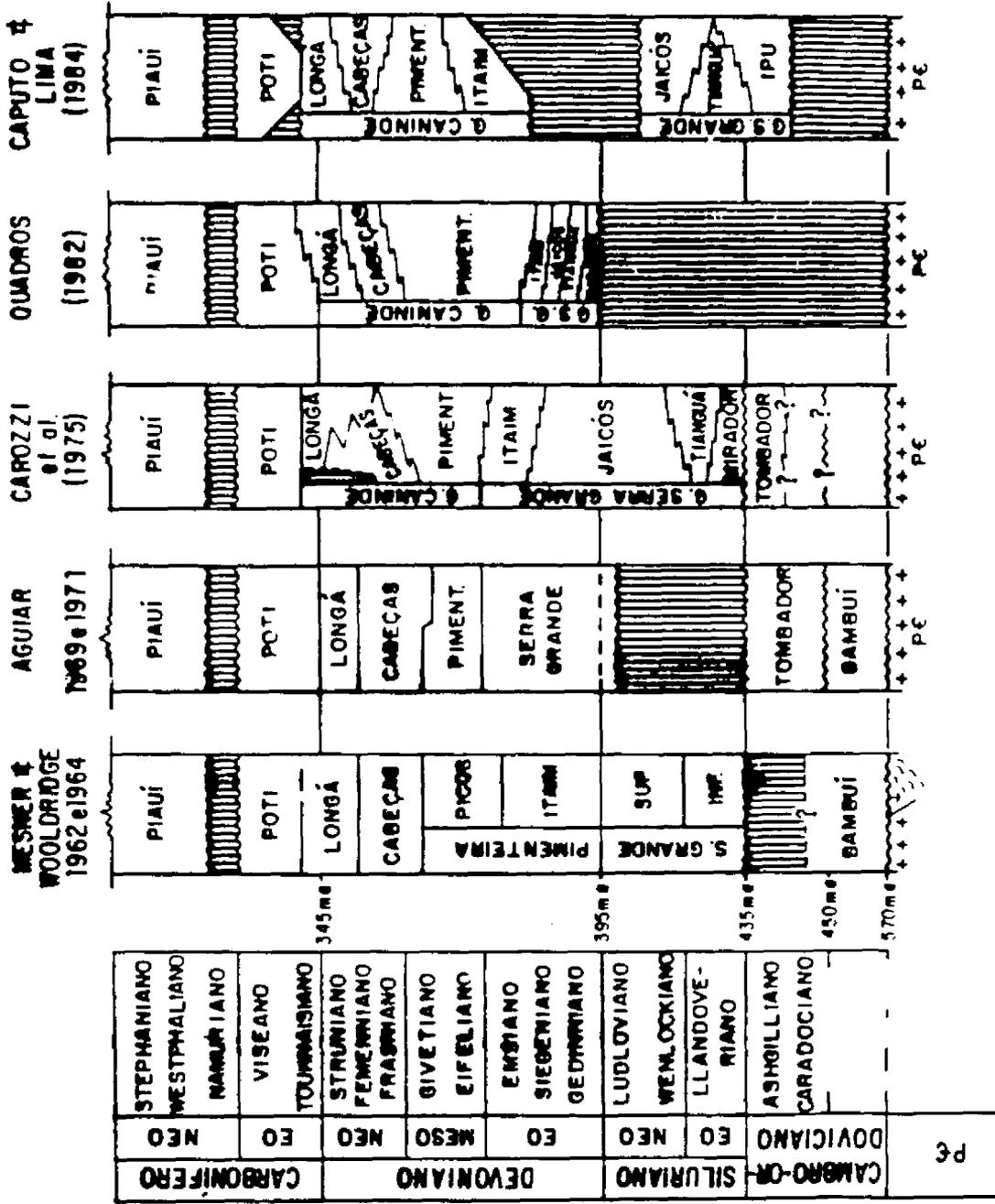


Fig. 2.5 - Quadro comparativo de algumas colunas estratigráficas propostas para parte da seção paleozóica da Bacia do Parnaíba.

FONTE: Cunha (1986).

2.1.2 - SEQUÊNCIA SILURODEVONIANA (PALEOZÓICO)

Composta pelos Grupos Serra Grande (Formações Ipu, Tianguá e Jaicós) e Canindé (Formações Itaim, Pimenteira, Cabeças e Longá).

2.1.2.1 - GRUPO SERRA GRANDE

O Grupo Serra Grande aflora, em geral, nas bordas leste e sudeste da bacia sob a forma de escarpas abruptas, caracterizando-se por marcante variação de espessura provavelmente relacionada com a estrutura do substrado (Lima e Leite, 1978). Segundo a concepção de Caputo e Lima (1984), o Grupo Serra Grande pode ser subdividido da base para o topo em três formações: Ipu, Tianguá e Jaicós.

A Formação Ipu é composta de arenitos, conglomerados, arenitos conglomeráticos e diamictitos, apresentando na região nordeste da bacia espessura de até 300 metros. A granulometria dos arenitos varia de fina a grosseira. O arenito conglomerático possui coloração branca a creme, podendo ser friável ou bem cimentado e conter seixos de quartzo com mais de 5 cm de diâmetro. As camadas de conglomerado são compostas principalmente por seixos e matações de quartzo e quartzito com até 50 cm de diâmetro, imersos numa matriz arenosa. Os diamictitos contêm clastos de quartzo, quartzito, arenito fino e de rochas do embasamento cristalino imersos numa matriz arenoargilosa. De acordo com Caputo e Lima (1984), a Formação Ipu depositou-se entre o final do Ordoviciano e o início do Siluriano.

A Formação Tianguá é composta de três membros: (1) folhelho preto a cinza escuro, siderítico, bioturbado ou laminado, síltico; (2) arenito fino a médio, com intercalações de folhelho cinza esbranquiçado, e (3) folhelho e síltito intercalados, cinza escuros e verdes, micáceos, sideríticos. Espessuras de até 25 metros em superfície e 270 metros em subsuperfície foram registradas. A Formação Tianguá repousa concordantemente sobre a Formação Ipu. Ao contrário do que se

verifica na formação basal, alguns fósseis podem ser aqui encontrados. Uma idade Eosiluriana é atribuída para a Formação Tianguá (Caputo e Lima, 1984).

A Formação Jaicós é constituída por arenito médio, grosseiro a conglomerático, cinza esbranquiçado, creme, castanho, com estratificação cruzada, mal selecionado e friável. A unidade é mineralógica e texturalmente imatura. Sua espessura máxima alcança 400 metros na borda nordeste da bacia. A Formação Jaicós sobrepõe concordantemente a Formação Tianguá e discordantemente a Formação Itaim. De acordo com Caputo e Lima (1984), a idade desta formação situa-se entre o Neolandoveriano e o Wenlockiano (Eo a Mesosiluriano).

O contato superior do Grupo Serra Grande com os clásticos finos da Formação Pimenteira é concordante e gradativo (Lima e Leite, 1978). Entretanto, mostra contato discordante com os clásticos finos da Formação Itaim (Caputo, 1984).

2.1.2.2 - GRUPO CANINDÉ

O Grupo Canindé compreende as Formações Itaim, Pimenteira, Cabeças e Longá (Caputo e Lima, 1984; Caputo, 1984).

A Formação Itaim é composta por intercalações de arenitos e folhelhos, predominando estes últimos nos flancos norte e nordeste da bacia (Carozzi et al., 1975). Os arenitos variam de quartzosos a feldspáticos, sendo em geral finos a muito finos e de coloração cinza-esbranquiçada. Os folhelhos são acinzentados com predomínio de caulinita, illita e clorita. O posicionamento desta formação como parte integrante do Grupo Canindé, contrariamente ao esquema estratigráfico proposto por Quadros (1982), é justificado pelo seu relacionamento erosivo e discordante com a Formação Jaicós (Grupo Serra Grande) (Caputo e Lima, 1984; Caputo, 1984; Cunha, 1986). De acordo com Caputo (1984), a Formação Itaim é de idade Emsiana (Eodevoniano).

A Formação Pimenteira consiste de folhelhos cinza-escuro a esverdeados, caulíníticos e micáceos, com intercalações de arenitos argilosos finos e amarelados, principalmente, nos lados sudeste, sul, sudoeste e noroeste da bacia. Níveis ferruginosos ocorrem por toda a seção. A presença de inúmeros ciclotemas é uma das características litológicas desta unidade. Esta formação ocorre em estreita faixa na porção leste e sudeste da bacia, embora sua melhor área de exposição ocorra no lado sudoeste, onde também alcança maiores espessuras (superior a 100 metros) (Lima e Leite, 1978). Seu contato inferior com o Grupo Serra Grande é concordante e gradativo. A Formação Pimenteira é mais rica em fósseis que a Formação Itaim (Petri e Fúlfaro, 1983). Segundo Caputo (1984), a seção Pimenteira é de idade Meso a Neodevoniana.

A Formação Cabeças é constituída essencialmente por arenitos na borda leste da bacia, em contato gradacional com os folhelhos da Formação Pimenteira. Isto também pode ser observado no lado oeste. A base desta formação caracteriza-se pela presença de arenitos grosseiros, creme e esbranquiçados, mal selecionados, passando a siltitos argilosos. Níveis intercalados de folhelhos cinza são observados. No topo da seqüência, os arenitos são mais finos e contêm níveis intercalados de siltitos e folhelhos acinzentados, às vezes piritosos. Aguiar (1971) reportou a presença de paraconglomerados, posteriormente denominados "diamictitos" por Andrade e Daemon (1974), nas proximidades de Pedro Afonso (GO) e do rio Araguaia. Esses paraconglomerados de matriz argilosa são constituídos por seixos de dimensões variadas, arredondados a subarredondados, provenientes do embasamento cristalino, da própria Formação Cabeças e principalmente da Formação Pimenteira. Níveis oxidados de arenitos finos gradam para outros sílticos argilosos de forma cíclica. As melhores exposições da Formação Cabeças são encontradas na borda leste da bacia sob a forma de escarpas abruptas em mesetas aplainadas ou como extensos tabuleiros planos. Atinge aí espessuras de até 300 metros (Lima e Leite, 1978). O contato inferior com a Formação Pimenteira é concordante e gradativo, embora possa se caracterizar localmente por acentuada mudança litológica. Caputo (1984) atribui uma idade Famenniana (Neodevoniana) para esta formação.

A Formação Longá é constituída predominantemente por uma seqüência pelítica de folhelhos. Na sua parte basal destaca-se a presença de folhelhos escuros, esverdeados e arroxeados, homogêneos ou bem laminados, bioturbados, localmente calcíferos, micromicáceos. Siltitos argilosos ocorrem secundariamente. Na sua parte intermediária é mais frequente a presença de arenitos finos e siltitos, amarelados, micáceos, argilosos e ferruginosos. A porção superior é composta por uma seqüência gradacional de folhelhos e siltitos cinza escuros, micáceos, às vezes calcíferos, piritosos, bioturbados, com frequentes intercalações de arenitos grosseiros a conglomeráticos, ferruginosos, caracterizando a transição para a Formação Poti. Os argilominerais predominantes nesta Formação são a illita e a clorita. Montmorilonita, caulinita e corrensita aparecem em menor proporção (Farias e Mabessone, 1978). Devido ao seu caráter essencialmente pelítico, não se observa grandes áreas de exposições. Suas maiores espessuras são observadas na borda leste da bacia, variando entre 90 e 120 metros (Lima e Leite, 1978). O contato inferior com a formação Cabeças em geral é concordante. A Formação Longá não é tão rica em fósseis. De acordo com Caputo (1984), a idade desta formação situa-se entre os andares Famenniano e Tournaisiano (Neodevoniano a Eocarbonífero).

2.1.3 - SEQÜÊNCIA PERMOCARBONÍFERA (PALEOZÓICO)

Composta pelas Formações Poti, Piauí, Pedra de Fogo e Motuca.

A Formação Poti é constituída em sua porção inferior por arenitos róseo-esbranquiçados, quartzosos, cauliniticos, micáceos, friáveis, granulação fina a média, com ocasionais níveis conglomeráticos. O seu contato com o intervalo superior é caracterizado pela passagem de arenito para siltitos, folhelhos e diamictitos (Andrade e Camarço, 1984). Este último consiste de uma alternância de siltitos e arenitos predominantemente finos, com níveis subordinados de folhelhos carbonosos, contendo restos vegetais carbonizados ou delgadas

laminações de carvão. Próximo ao contato com a Formação Piauí pode-se observar a presença de finas intercalações de calcarenitos ou arenitos calcíferos. Um dos aspectos mais marcantes de toda a seqüência são as variações faciológicas, tanto a nível horizontal como vertical. As áreas de afloramento distribuem-se nas porções leste, sudeste, sul, sudoeste e oeste da bacia. As maiores espessuras em sua parte leste chegam a atingir 180 metros (Lima e Leite, 1978). O contato inferior com a Formação Longá é concordante e gradacional. Apenas localmente pode ser caracterizado por brusca mudança litológica. Há presença de uma escassa fauna marinha e de restos vegetais terrestres. De acordo com Caputo (1984), a idade desta seqüência é Eocarbonífera (andares Tournasiano e Viséano).

A Formação Piauí também pode ser dividida em dois membros. O membro inferior é constituído por arenitos avermelhados, predominantemente quartzosos, finos a médios, com níveis conglomeráticos basais contendo matações de quartzo e quartzito. O membro superior é composto por arenitos avermelhados, róseo avermelhados em direção ao topo, quartzosos, finos a médios e friáveis, com intercalações de folhelhos, siltitos e camadas de sílex. Os folhelhos e siltitos são vermelhos, micromicáceos, regularmente laminados, às vezes silicificados com considerável distribuição horizontal. As camadas de sílex são de coloração rósea, formando bancos resistentes com aproximadamente 4 metros de espessura. Isto sobressai-se na topografia regional através de escarpas com quinas em ângulos retos. Os estratos Piauí, a exemplo dos demais estratos Paleozóicos, possuem uma faixa de exposição disposta na direção aproximada N-S no flanco oriental da bacia, estreitando-se para o norte. Sua espessura é bastante variável, mas encontra um valor máximo na porção centro-sul da bacia onde alcança 215 metros (Andrade e Camarço, 1984). O contato inferior com a Formação Poti pode ser discordante ou não mostrar evidências de discordância. A idade dos estratos Piauí, de acordo com Caputo (1984), situa-se entre os andares Westphaliano a Stephaniano (Neocarbonífero).

A Formação Pedra de Fogo caracteriza-se por possuir uma sedimentação cíclica constituída de intercalações de arenitos finos,

siltitos, folhelhos e bancos carbonáticos contendo abundantes níveis de concreções silicosas. Níveis silicificados de oólitos, pellets e coquinas, com restos de peixes, ocorrem comumente associados aos bancos carbonáticos (Faria Júnior e Truckenbrodt, 1980a). De acordo com Faria Júnior (1979), a Formação Pedra de Fogo pode ser dividida em três membros denominados: sílex basal, médio e superior. No membro inferior intercalam-se siltitos e bancos carbonáticos contendo abundantes concreções e horizontes silicosos. Na parte média encontram-se pacotes de arenitos, que são seguidos até o topo por ciclotemas de siltitos, folhelhos e bancos carbonáticos com pequenas concreções silicosas. A seqüência superior inicia-se com intercalações laminares de folhelhos e níveis descontínuos de sílex, contendo brechas intraformacionais, que passam para novos ciclotemas em direção ao topo da formação. Os mais freqüentes argilominerais desta formação são esmectita (montmorilonita) e subordinadamente ilita (Faria Júnior e Truckenbrodt, 1980b). A Formação Pedra de Fogo aflora quase que continuamente na porção centro-leste, oeste e principalmente faixa centro-sul da bacia. Sua espessura é variável alcançando valores de até 100 metros (Santos et al., 1984). O contato inferior com a Formação Piauí é, em geral, concordante. Às vezes caracteriza-se por brusca mudança litológica. Entretanto, apenas localmente é discordante. Restos de peixes, troncos silicificados e diversas plantas terrestres podem ser observados. Faria Júnior e Truckenbrodt (1980a) destacam a presença de estromatólitos. Segundo Caputo (1984), a Formação Pedra de Fogo é de idade Eo a Mesopermiana.

A Formação Motuca constitui a parte superior da coluna estratigráfica paleozóica da bacia, não apresentando grandes variações laterais de fácies. Em sua seção inferior predominam arenitos finos a médios, róseos a esbranquiçados, com intercalações subordinadas de folhelhos e siltitos avermelhados, micáceos e calcíferos. Na seção média predominam siltitos e folhelhos esverdeados, bem laminados e intercalações de níveis carbonáticos. Camadas de anidrita podem aí alcançar até 20 metros de espessura (Petri e Fúlfaro, 1983). A seção superior constitui-se de arenitos avermelhados, finos a médios, argilosos e localmente micáceos. A Formação Motuca aflora numa faixa contínua e rela-

tivamente estreita na região centro-sul da bacia, com uma espessura total em torno de 100 a 110 metros (Lima e Leite, 1978). O contato inferior com a Formação Pedra de Fogo é geralmente gradativo. Restos de peixes podem ser encontrados, juntamente com gastrópodes. Caputo (1984) atribui uma idade Neopermiana para esta unidade.

2.1.4 - A SEQÜÊNCIA SUPERIOR MESOCENOZÓICA

Compreende as Formações Sambaíba, Mosquito, Pastos Bons, Corda, Sardinha, Codó, Grajaú, Itapecuru e Pirabas.

A Formação Sambaíba é composta predominantemente por arenitos avermelhados, finos e médios, friáveis. No topo da seqüência, estes arenitos mostram-se bastante silicificados, podendo também ser observados níveis de basaltos. Suas principais exposições encontram-se nas porções sudeste e sul da bacia, mas suas maiores espessuras são encontradas na porção centro-sul, atingindo cerca de 200 metros (Lima e Leite, 1978). Aguiar (1971) reportou a dificuldade de se estimar sua espessura, por encontrar-se sempre truncada por derrames basálticos ou pelas formações mais novas. O contato inferior com a Formação Motuca é admitido como discordante por Cunha e Carneiro (1972), em virtude da brusca passagem de folhelhos (Motuca) para arenitos (Sambaíba). Este fato não constitui, por si só, comprovação de discordância (Petri e Fúlfaro, 1983). Por outro lado, Lima e Leite (1978) evidenciaram concordância em diversos pontos visitados em campo sem, no entanto, observarem gradação litológica. A Formação Sambaíba é afossilífera. Lima e Leite (1978) atribuem uma idade Triássico médio a superior para esta unidade.

A Formação Mosquito é constituída por derrames basálticos com intercalações de arenitos de ocorrência restrita. Os basaltos são esverdeados, afaníticos, tendo amígdalas preenchidas por calcedônia, zeólitas e material criptocristalino esverdeado. Estes derrames afloram principalmente na região centro-oeste da bacia. Sua espessura é bastante variável, podendo atingir 175 metros (Lima e Leite, 1978). O con-

tato inferior com a Formação Sambaíba é discordante. Lima e Leite (1978) confirmam idade Jurotriássica para os basaltos da formação Mosquito, de acordo com datações radiométricas K/Ar obtidas por estes autores e comparações com outras pré-existentes.

A Formação Pastos Bons é composta na base por conglomerados e arenitos argilosos finos e médios de cores variadas, passando a arenitos avermelhados, finos e argilosos, com intercalações de folhelhos e siltitos no topo. Sua principal área de exposição encontra-se na parte centro-oeste da bacia. A espessura é bastante variável, oscilando entre 35 e 60 metros (Lima e Leite, 1978). Seu contato inferior é sempre discordante e marcado, em geral, pela presença de um conglomerado basal. A idade desta formação é Neojurássica, de acordo com observações paleontológicas feitas por Pinto e Purper (1974).

A Formação Corda é constituída litologicamente por arenitos grosseiros a conglomeráticos, com blocos de até 20 cm de basalto alterado, ou por arenitos argilosos finos a médios, ocasionalmente grosseiros, avermelhados. Aflora numa faixa relativamente contínua na porção central da bacia, com espessura variando entre 30 e 84 metros (Lima e Leite, 1978). Seu contato com a Formação Pastos Bons é concordante e gradacional. Com base em seu conteúdo fossilífero, Lima e Leite (1978) atribuem uma idade Jurássico superior para a Formação Corda.

A Formação Sardinha é constituída essencialmente por basaltos escuros de textura amigdaloidal que, quando decompostos, originam solos avermelhados ou arroxeados. Sua área de exposição é muito restrita e sua espessura média em superfície é da ordem de 20 metros (Aguilar, 1971). Acredita-se que estes derrames estejam abaixo da Formação Codó, embora não se tenha visto esta relação em campo (Cunha e Carneiro, 1972). Provavelmente, sua idade é Cretáceo inferior (Lima e Leite, 1978).

A Formação Codó é composta na base por conglomerados e folhelhos cinza esverdeados a pretos, níveis de calcário e gipsita,

passando em direção ao topo para arenitos e siltitos, carbonosos, calcíferos e piritosos. Suas áreas de exposição são restritas e descontínuas, ocupando os vales dos principais cursos d'água na porção central da bacia. Registros de até 20 metros de espessura foram obtidos por Lima e Leite (1978), que destacaram a dificuldade de obtenção destes dados em função de sua morfologia arrasada. O caráter discordante do contato inferior é evidenciado tanto em superfície, quanto em sub-superfície (Santos et al., 1984). Esta formação possui idade Eocretácea (Regalli et al., 1974).

A Formação Grajaú compõe-se de arenitos esbranquiçados a cremes, finos a conglomeráticos, friáveis ou às vezes silicificados. Aflora principalmente nas porções centro-oeste e centro-norte da bacia, constituindo uma faixa relativamente estreita e descontínua na direção E-W. A espessura aflorante é pequena e variável, com os maiores registros ocorrendo em sua parte oeste. Esta unidade recobre discordantemente as Formações Sambaíba, Mosquito e Corda. É afossilífera e considerada como pertencente ao Cretácio inferior pela sua equivalência cronoestratigráfica com a Formação Codó (Lima e Leite, 1978).

A Formação Itapecuru é constituída por arenitos avermelhados e esbranquiçados de textura variada, com intercalações de argilitos e siltitos argilosos de coloração variada. Suas áreas de exposição são extensas e contínuas, principalmente nas porções centro-oeste, norte e centro-leste da bacia. A espessura aflorante pode alcançar 200 metros (Lima e Leite, 1978). O contato inferior desta unidade com as Formações Codó e Grajaú é concordante, apresentando discordâncias apenas localmente. Apesar de não terem sido encontrados registros fósseis desta unidade na Bacia do Parnaíba, os fósseis encontrados na seção Itapecuru da Bacia de São Luis conduzem a uma idade Albiano-Cenomaniano para a Formação Itapecuru aqui discutida (Lima e Leite, 1978).

A seqüência Mesocenozóica da Bacia do Parnaíba compreende ainda as Formações Pirabas (calcários e folhelhos), aflorando em áreas restritas dos Estados do Maranhão e Piauí; as coberturas lateríticas e/ou arenosas, distribuídas ao longo de toda a bacia; e as aluviões associadas aos principais cursos d'água da bacia.

CAPÍTULO 3

O COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS ROCHAS SEDIMENTARES (400 A 2500 nm)

A utilidade do sensoriamento remoto multiespectral baseia-se no conhecimento das propriedades espectrais dos alvos, que refletem basicamente os mecanismos de interação da radiação eletromagnética com suas superfícies. Esta interação pode dar-se a nível macroscópico e microscópico. No primeiro mecanismo seus efeitos são controlados pelas propriedades físicas das superfícies, enquanto que no segundo a interação está mais diretamente relacionada com a composição e mineralogia da rocha.

O comportamento da reflectância espectral dos minerais e rochas é então definido pela influência exercida por estes dois mecanismos, sejam os dados apresentados na forma de medidas espectroscópicas ou na forma de imagens. Uma imagem nada mais é do que uma representação pictorial destes mecanismos, em função das características macroscópicas das superfícies dos alvos e das possíveis interações energéticas com os átomos e moléculas de seus minerais (Meneses, 1986). As medidas espectroscópicas de campo ou laboratório buscam o estabelecimento e a compreensão dos padrões espectrais dos diversos materiais geológicos, como subsídio para a análise e interpretação de imagens multiespectrais e o consequente aproveitamento de seu real potencial de informações. A complexidade da natureza física das superfícies, a influência dos efeitos atmosféricos, a ambiguidade do comportamento espectral de alguns alvos geológicos e a avaliação do desempenho e projeção dos sistemas sensores, são algumas razões que justificam a necessidade destas medidas para o sensoriamento remoto (Watson, 1972; Salisbury e Hunt, 1974; Milton, 1980; Duggin e Philipson, 1982; Steven, 1987).

Os estudos envolvendo o comportamento espectral de rochas sedimentares têm recebido menos atenção na literatura do que os de minerais e rochas ígneas. Hunt e Salisbury (1976) atribuíram duas

razões para isto. Primeiro, é que a maior parte dos espectroscopistas iniciam suas pesquisas com os minerais, por poderem especificá-los com precisão em termos de composição e estrutura. Segundo, quando tais estudos têm se estendidos às rochas, as ígneas têm sido as preferidas em decorrência do sensoriamento remoto extraterrestre.

No âmbito das rochas sedimentares, os calcários, arenitos e folhelhos têm sido as mais estudadas. Feições espectrais bem definidas são comuns nestas rochas. Entretanto, suas caracterizações requerem, antes de tudo, um conhecimento de como a radiação eletromagnética interage a nível macroscópico e, principalmente, microscópico, com a superfície destes materiais. É o que será visto a seguir.

3.1 - MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA ENERGIA RADIANTE COM A SUPERFÍCIE DOS ALVOS

3.1.1 - INTERAÇÃO A NÍVEL MACROSCÓPICO

Envolve fatores tais como granulometria, forma e compactação das partículas minerais e, principalmente, as macro e microvariações da topografia. Neste contexto, de fundamental importância é considerar a influência da geometria fonte-alvo-sensor na obtenção dos dados.

A influência do tamanho das partículas minerais na aquisição dos dados espectrais tem sido estudada por diversos autores (Hovis, 1965; Hovis e Callahan, 1966; Aronson et al. 1967; Adams e Filice, 1967; Vincent e Hunt, 1968; Hunt e Vincent, 1968; Pieters, 1983). Variações na reflectância total de uma determinada rocha podem ser observadas com a diminuição do tamanho de suas partículas minerais, embora este comportamento seja dependente da opacidade do material. Se ele tem comportamento transparente, verifica-se um aumento de albedo com a diminuição do tamanho das partículas, ocorrendo o contrário com material opaco (Salisbury e Hunt, 1968). Tal comportamento é uma função dos valores das constantes óticas dos materiais, podendo ser explicado de

modo análogo ao feito por Vincent e Hunt (1968), ao estudarem o comportamento de material pulverizado no infravermelho médio. Estas modificações podem ocorrer em diferentes proporções de acordo com o comprimento de onda analisado e com o tipo de material. Hovis (1965) observou, por exemplo, que para algumas espécies hidratadas de óxidos de ferro a dependência do tamanho da partícula é mais pronunciada próximo a 2000 nm. A variação no tamanho das partículas também pode realçar ou diminuir o contraste das feições espectrais, conforme demonstrado por Hovis e Callahan (1966).

Adams e Filice (1967) observaram efeitos mensuráveis, quanto à influência da forma e compactação das partículas na reflectância total e espectral de um material rochoso pulverizado de composição silicática. Os resultados de seus experimentos mostraram um aumento da reflectância com o acréscimo da compactação do material na porção visível do espectro, embora comportamento contrário tenha sido observado entre 1000 e 2000 nm. Quando as partículas têm forma esférica, o aumento das reflexões internas e da trajetória dos raios luminosos entre elas atenuam a radiação refletida. O albedo, por conseguinte, tende a diminuir (Vincent e Hunt, 1968). Na natureza, considerações como estas não têm implicações tão fortes a nível de sensoriamento remoto, já que variações regulares na forma das partículas não são comuns nos materiais de um determinado ambiente geológico (Adams e Filice, 1967).

As macro e microvariações da topografia da superfície imageada produzem modificações de iluminação de suas faces, alterando o padrão das áreas sombreadas e não-sombreadas, conforme os diferentes ângulos solares. Isto pode ser observado na Figura 3.1. Conforme o ângulo de incidência da luz solar com relação à orientação da face iluminada, diferentes condições de irradiância são obtidas. A variação na reflectância espectral advinda com a mudança deste ângulo representa um substancial desvio da condição Lambertiana, pressuposto adotado como ideal para o sensoriamento remoto. De fato, as superfícies naturais exibem a denominada Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional. Sua reflectância depende da direção do fluxo incidente

e da direção ao longo da qual os raios são detectados (Slater, 1980). Desta forma, a discriminação dos alvos pode ser mais efetiva para algumas geometrias de medidas do que para outras (Egbert e Ulaby, 1972; Duggin, 1985).

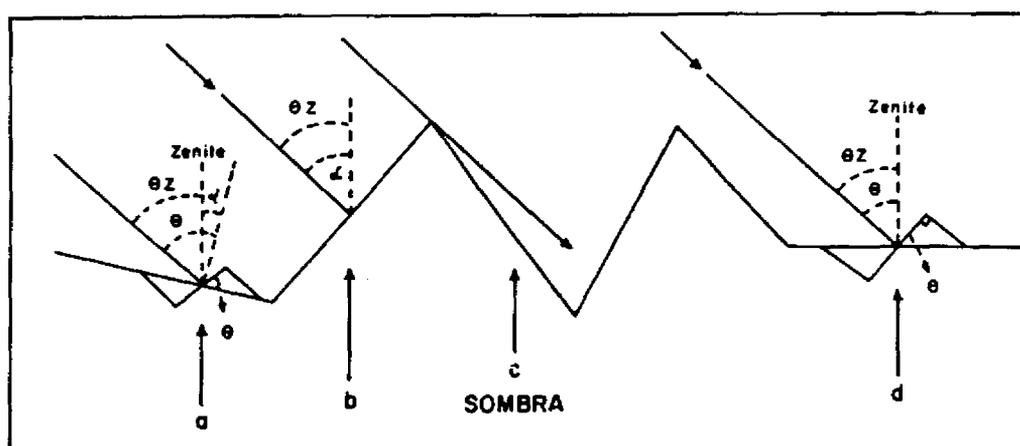


Fig. 3.1 - A influência das macro e micro variações da topografia nas condições de iluminação de sua superfície.

FONTE: Slater (1980).

θ = ângulo de incidência; é também o ângulo entre a superfície perpendicular ao fluxo incidente à superfície real.

θ_z = ângulo zênite solar.

α = ângulo entre a normal à superfície e o zênite.

Quando $\theta_z = \alpha \Rightarrow$ condições de máxima irradiância

$\theta_z + \alpha = \theta > 90^\circ \Rightarrow$ mínima irradiância

3.1.2 - INTERAÇÃO A NÍVEL MICROSCÓPICO

Ocorre ao nível atômico e molecular, originando as feições espectrais vistas nos espectros de reflectância dos minerais e

rochas. Baseado no fato que cada substância ou material difere entre si em função de seu arranjo atômico, poder-se-ia imaginar que todos eles poderiam ser discriminados por sensoriamento remoto pelas variações em sua reflectância o que na verdade não ocorre.

Existem diversos fatores que complicam a análise dos dados de sensores remotos, impossibilitando a discriminação de muitos materiais. Salisbury e Hunt (1974) relacionaram alguns particularmente importantes para a geologia:

- (1) muitos dos minerais constituintes das rochas não exibem feições espectrais composicionalmente diagnósticas entre 400 e 2500 nm; convém adicionar o fato de algumas delas só poderem ser detectadas por sensores de alta resolução espectral;
- (2) os constituintes menores ou os produtos de alteração de uma rocha podem dominar seu espectro de reflectância;
- (3) muitas rochas contêm minerais opacos que, em determinada quantidade, não apenas reduzem o albedo da rocha, como também mascaram suas feições espectrais;
- (4) muitas das feições espectrais diagnósticas como algumas de rochas carbonáticas, podem ser obliteradas pela absorção atmosférica.

A situação é muito mais complexa ao imaginar-se que a radiação que chega a um sensor é a integração da energia radiante emitida ou refletida pelo alvo e suas vizinhanças, acrescida da influência de efeitos atmosféricos ou da posição relativa fonte-alvo-sensor. As variações texturais da superfície dos alvos exercem, neste último contexto, conforme já discutido, efeitos muito significativos sobre a obtenção dos dados espectrais.

Desta forma, a compreensão das medidas espectroscópicas de campo ou laboratório, como também a própria análise espectral de imagens, requer um conhecimento das variáveis que intervêm no processo macroscópico de interação da energia radiante com a superfície dos alvos e dos processos de transições eletrônicas que originam as diversas feições espectrais diagnósticas de minerais e rochas, abordagem do item seguinte.

3.2 - A ORIGEM DAS FEIÇÕES ESPECTRAIS DIAGNÓSTICAS DE MINERAIS E ROCHAS

A teoria quântica é importante para o sensoriamento remoto, porque fornece o conceito de níveis discretos de energia. Cada átomo se caracteriza por uma energia mínima possível (estado fundamental ou estacionário) e por uma série de estados excitados de energia mais elevada. Os elétrons nos átomos permanecem indefinidamente no estado estacionário até que algo, como a incidência de energia radiante, provoque transições para níveis excitados de energia mais alta (Hunt, 1980). Os valores ou arranjos destes níveis são diferentes para cada material, o que explica a possibilidade da identificação de alvos por feições espectrais que serão então características de um dado material.

Ao nível de minerais e rochas, estas feições originam-se devido a dois processos: eletrônicos (transições atômicas) e vibracionais (transições moleculares).

3.2.1 - PROCESSOS ELETRÔNICOS

A energia eletrônica é aquela em que elétrons, em torno de um átomo ou isolados, passam a adotar uma nova configuração eletrônica, em função de uma grande quantidade de energia presente. Por isso mesmo, a evidência para este tipo de transição é observada predominantemente no visível e ultravioleta até aproximadamente 1200 nm.

As feições espectrais decorrentes destes processos são essencialmente determinadas pela presença ou ausência dos metais de transição. Entretanto, certos elementos ou radicais comuns nos minerais (Si, Al, K, Ca e alguns bromatos e sulfatos) não possuem níveis energéticos cujas transições eletrônicas possam gerar feições espectrais. Conseqüentemente, o sensoriamento remoto não pode obter informações diretas sobre a composição total das rochas neste intervalo espectral, mas apenas sobre a particularidade de certos elementos ou íons presentes na estrutura dos minerais (Hunt, 1980).

São três os processos de transições eletrônicas, dos quais os dois primeiros são os mais importantes: campo cristalino, transferência de carga e centro de cores. Este último, restrito particularmente a haletos, origina feições espectrais no visível que não podem ser explicadas pela química ou presença de impurezas, mas apenas pela interação da energia radiante com cristais que mostram defeitos em sua estrutura (Nassau, 1980). Pelo seu limitado número de ocorrências, não será discutido aqui.

As cores originadas pelo campo cristalino podem manifestar-se sempre que em um sólido existam íons metálicos com elétrons desemparelhados. Por isso, o que primeiro determina a feição espectral é o estado de valência do íon (Fe^{+2} ou Fe^{+3} , por exemplo), o número de coordenação dos ligantes e o sítio de simetria, conforme destacou Nassau (1980).

Átomos de metais de transição, como Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn e particularmente Fe, quando presentes num mineral, estão sujeitos às forças de atração eletrostática de seus ligantes. Quando o íon livre dos metais de transição absorve radiação eletromagnética, ocorre uma excitação de um ou mais elétrons desemparelhados de um dos orbitais de mais baixa energia para outro de energia mais alta. A energia correspondente ao comprimento de onda mais intensamente absorvido definirá, nesta posição do espectro, uma banda de absorção que consistirá na feição espectral de interesse ao sensoriamento remoto para a

identificação do material estudado. As feições espectrais originadas pelo campo cristalino são em geral amplas e rasas.

Transferência de carga refere-se ao processo em que a energia absorvida pelo material propicia a migração de elétrons entre íons vizinhos ou entre íons e seus ligantes, por estarem menos fortemente enlaçados. Tais transferências podem ocorrer entre íons adjacentes do mesmo metal em diferentes estados de valência. Segundo Hunt (1977), o processo é basicamente uma oxi-redução fotoquímica e é freqüente quando pares de íons, tais como Fe^{+2} , Fe^{+3} , Mn^{+3} , Mn^{+2} ou Ti^{+3} e Ti^{+4} , estão adequadamente localizados em posições adjacentes. Ele é facilitado quando o desbalanço de cargas associa-se a uma substituição isomórfica, como ocorre na substituição de Fe^{+2} e Mg^{+2} por Al^{+3} e Fe^{+3} em silicatos ferromagnesianos.

A transição espectralmente mais freqüente observada em minerais e rochas ocorre entre o Fe-O. É caracterizada por um pronunciado decréscimo da reflectância do visível em direção ao ultravioleta, evidência comum no espectro de materiais alterados onde o Fe e O estão presentes ou mesmo de alguns hidróxidos (Hunt, 1980; Meneses, 1986).

É preciso destacar que as feições espectrais oriundas de processos de transferência de carga são muito mais intensas do que as de campo cristalino.

3.2.2 - PROCESSOS VIBRACIONAIS

A energia vibracional envolve o movimento relativo de átomos acerca de uma posição fixa. Evidências para tais tipos de transições podem ser observadas no infravermelho próximo, médio e distante, envolvendo assim uma quantidade menor de energia que a referida nos processos eletrônicos, embora as feições espectrais resultantes sejam muitas vezes mais intensas do que as observadas nestes últimos processos.

De acordo com Hunt (1977), o número e forma das vibrações e os valores dos níveis energéticos permitidos para cada material são determinados pelo número e tipo de seus constituintes atômicos, sua geometria espacial e a magnitude das forças de ligação entre eles. As vibrações de uma molécula consistem de pequenos deslocamentos de átomos de suas posições de equilíbrio. Para um sistema de N átomos, existem $3N - 6$ modos de vibração.

Os processos vibracionais podem ser caracterizados por três tipos:

- **fundamental** - ocorrem como resultado de uma transição do estado estacionário, onde o valor de todo o número quântico V_i é zero, para um estado onde todos são zero exceto um com valor unitário ($V_i = 1$). São típicos para comprimentos de onda superiores a 3000 nm;
- **"overtone"** - ocorrem quando a transição é do estado estacionário para um no qual $V_i = 2$, enquanto todos os outros números quânticos permanecem zero;
- **combinação de tom** - ocorrem quando uma transição toma lugar do nível estacionário ($V_i = 0$) para um nível cuja energia é determinada pela soma de dois ou mais fundamentais ou "overtones".

Feições espectrais características para "overtone" e combinação de tom aparecem entre 1100 e 5000 nm. Existem, entretanto, poucos grupos moleculares que originam feições vibracionais na região infravermelha. Dentre eles, a hidroxila, Al-OH, a água, os carbonatos e alguns sulfatos são os principais responsáveis por quase todas as feições espectrais dos materiais geológicos no intervalo 1200-3000 nm. As feições de água e hidroxila são importantes na discriminação dos produtos de alteração hidrotermal e dos argilominerais (Hunt e Salisbury, 1970).

3.3 - FEIÇÕES ESPECTRAIS REPRESENTATIVAS DOS PRINCIPAIS GRUPOS DE ROCHAS SEDIMENTARES

Feições espectrais bem definidas são comuns em rochas sedimentares, exceto no caso em que elas são mascaradas pela presença de material opaco carbonoso. Entretanto, estas feições são muito limitadas em sua origem. Ocorrem associadas a material carbonático (particularmente nos calcários), argilas, ou com a presença de produtos de intemperismo. As argilas, por exemplo, mostram feições espectrais muito comuns e intensas devido a presença de OH^- e/ou H_2O . A água, entretanto, pode ocorrer associada a um mineral de quatro maneiras: aprisionada em sua estrutura, ocupando seus interstícios, absorvida pelo mesmo ou como uma película d'água num processo de adsorção. Feições oriundas da presença do ferro, seja como íon ferroso presente em minerais argilosos ou como produtos de intemperismo (óxido férrico), também estão comumente presentes no espectro das rochas sedimentares (Hunt e Salisbury, 1976).

Os calcários, em geral, mostram um espectro caracterizado por fortes bandas de vibração molecular carbonática próximo a 2300 nm e acima de 2500 nm. Fracas combinações de tons carbonáticos, próximas a 1400 e 1900 nm, ocorrem associadas a componentes argilosos. Algumas rochas carbonáticas mostram feições espectrais fracas, próximo a 1000 nm, devido a ferro ferroso que comumente substitui magnésio nos dolomitos. Todas elas, por outro lado, tendem a mostrar espectros com uma rápida queda de intensidade da reflectância em direção ao azul e bandas discerníveis próximo a 500 e 860 nm devidas a óxidos férricos (Figura 3.2). O cobre, quando em solução sólida associado a calcita, pode exibir uma forte banda de absorção centrada próximo a 900 nm (Gaffey e Reed, 1987). O manganês também pode produzir fortes bandas em comprimentos de onda inferiores a 2000 nm (Gaffey, 1987). A presença de material opaco carbonoso nos calcários mascara as feições espectrais já mencionadas e diminui a reflectância total da rocha. De todas as impurezas, a matéria orgânica é a que tem maior influência espectral, principalmente quando finamente disseminada (Crowley, 1986). Meneses (1986) observou que variações muito pequenas na quantidade de matéria

orgânica (de ordem inferior a 0,04%) são responsáveis por uma significativa redução e conseqüente atenuação do contraste de absorção nas rochas carbonáticas da serra do Ramalho (BA).

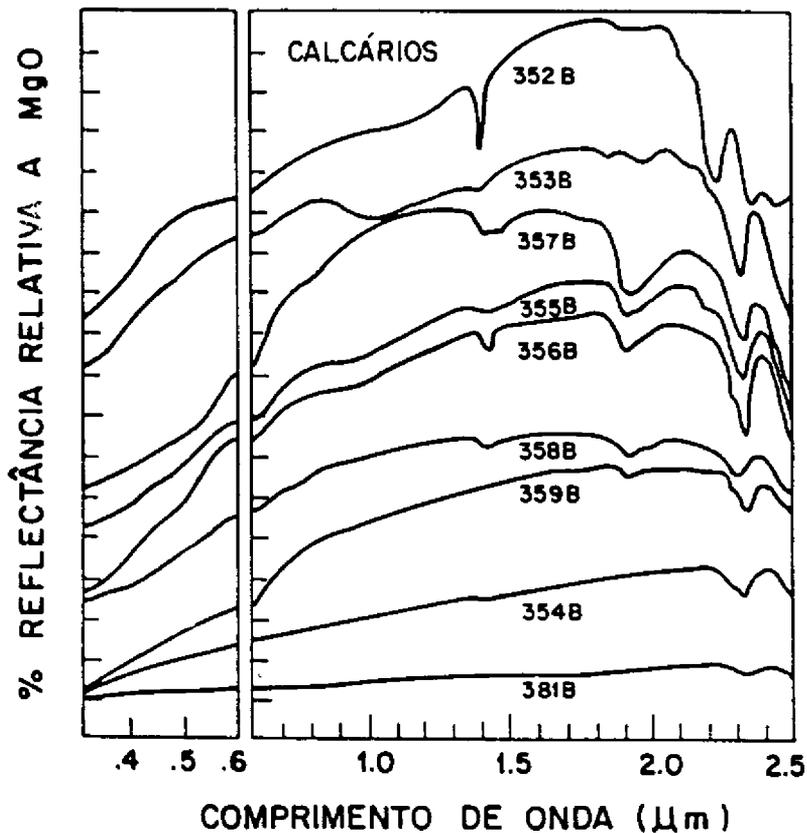


Fig. 3.2 - Curvas de reflectância obtidas a partir de amostras moídas de calcários.

FONTE: Hunt e Salisbury (1976).

- A variação do tamanho das partículas situa-se entre 74 e 250 μm .

Os arenitos exibem feições espectrais devidas à presença de óxidos férricos como coberturas ou manchas freqüentemente encontradas em grãos de quartzo. A exemplo dos calcários, há uma rápida queda na intensidade da reflectância em direção ao azul com bandas de

absorção situadas próximas de 500 e 860 nm. Feições intensas e bem definidas de hidroxila e/ou água, associadas a minerais argilosos, também podem ser observadas em 1400, 1900 e 2200 nm. Feições carbonáticas podem aparecer próximo a 2300 nm, pela presença deste material como cimento na rocha (Figura 3.3).

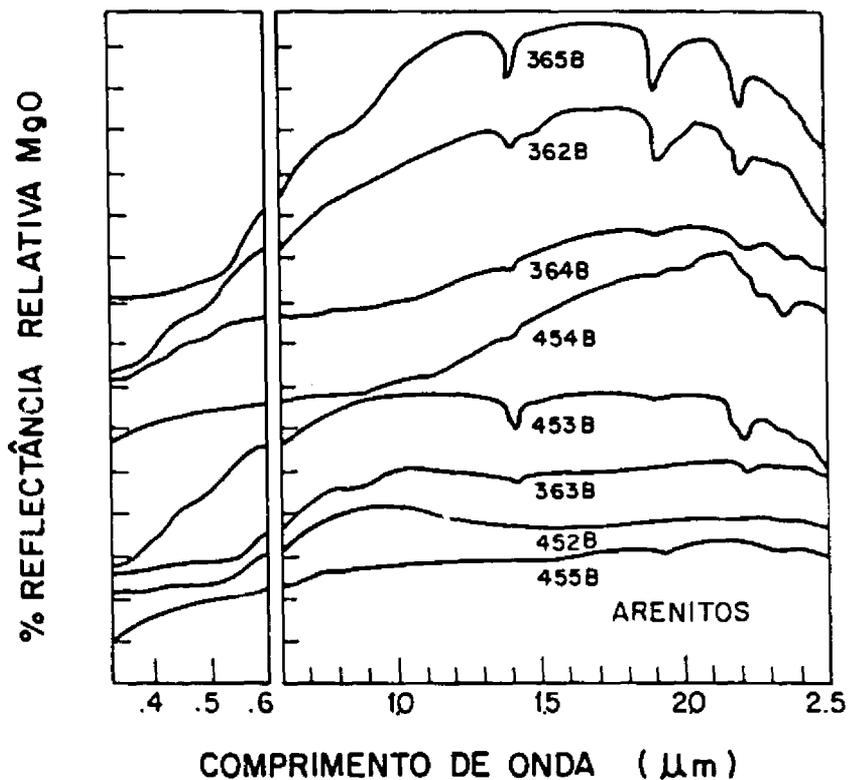


Fig. 3.3 - Curvas de reflectância espectral obtidas a partir de amostras moídas de arenitos.

FONTE: Hunt e Salisbury (1976).

- Partículas entre 74 e 250 μm .

Os folhelhos, devido à abundância de minerais argilosos, podem exibir curvas espectrais com fortes bandas de água e hidroxila próximas de 1400, 1900 e 2200 nm. Bandas carbonáticas também podem ser vistas quando da presença de cimento carbonático nestas rochas. Além das feições vibracionais, os folhelhos frequentemente mostram bandas de transições eletrônicas devidas a ferro férrico e ferroso. Entretan-

to, a matéria orgânica, comumente depositada com a argila em águas profundas, forma material opaco carbonoso que pode mascarar as feições espectrais oriundas de outros componentes (Figura 3.4).

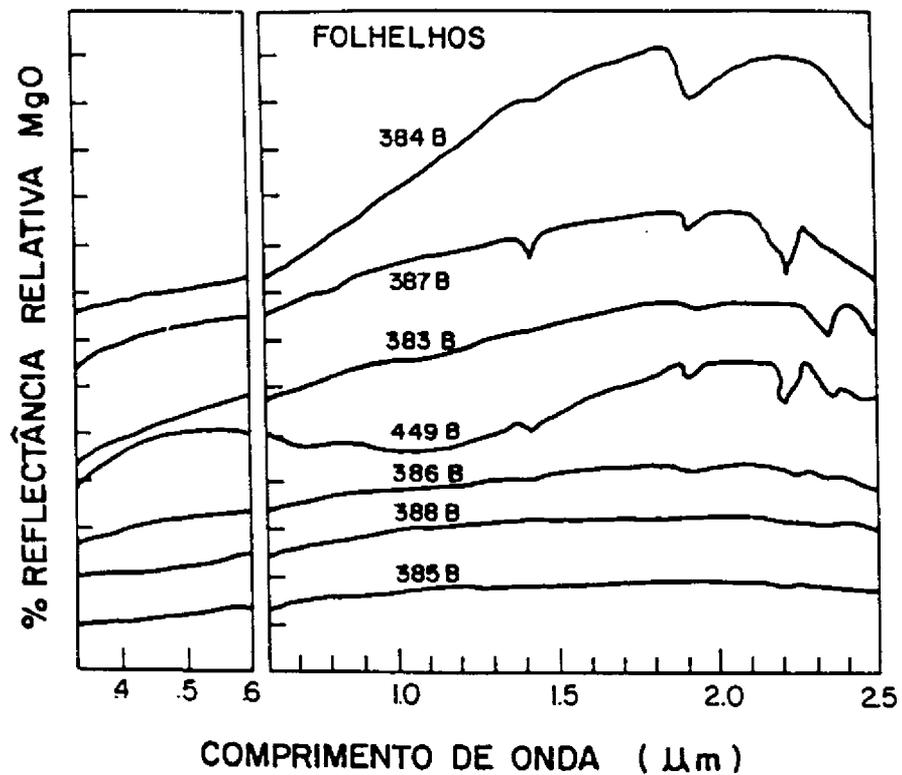


Fig. 3.4 - Curvas de reflectância espectral obtidas a partir de amostras moídas de folhelhos.

FONTE: Hunt e Salisbury (1976).

- Partículas entre 74 e 250 μm.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE TRABALHO

Este capítulo descreve o procedimento de trabalho adotado para alcançar os objetivos definidos no Capítulo 1. Aspectos metodológicos mais detalhados serão introduzidos concomitantemente à discussão dos capítulos seguintes.

4.1 - O CORRELACIONAMENTO ESTRATIGRÁFICO ESPECTRAL ENTRE POÇOS DE PERFURAÇÃO

O fluxograma da Figura 4.1 sintetiza os passos adotados para o correlacionamento espectral dos poços de perfuração.

Foram selecionados quatro poços para estudo, a partir dos quais foram coletadas 53 amostras. O espectrorradiômetro Optronic 740A foi utilizado para a obtenção dos dados espectrais, acerca destas 53 amostras. Quatro técnicas estatísticas foram aplicadas, com os seguintes objetivos:

- **Análise de Agrupamentos** - definir grupos de amostras em cada poço;
- **Análise Fatorial** - reduzir a dimensionalidade dos dados pela seleção de um subconjunto de variáveis importantes na discriminação espectral dos grupos;
- **Análise Discriminante Linear** - avaliar a separabilidade espectral dos grupos de rochas;
- **Correlação Cruzada** - determinar a posição de melhor ajuste geométrico entre duas colunas de dados espectrais.

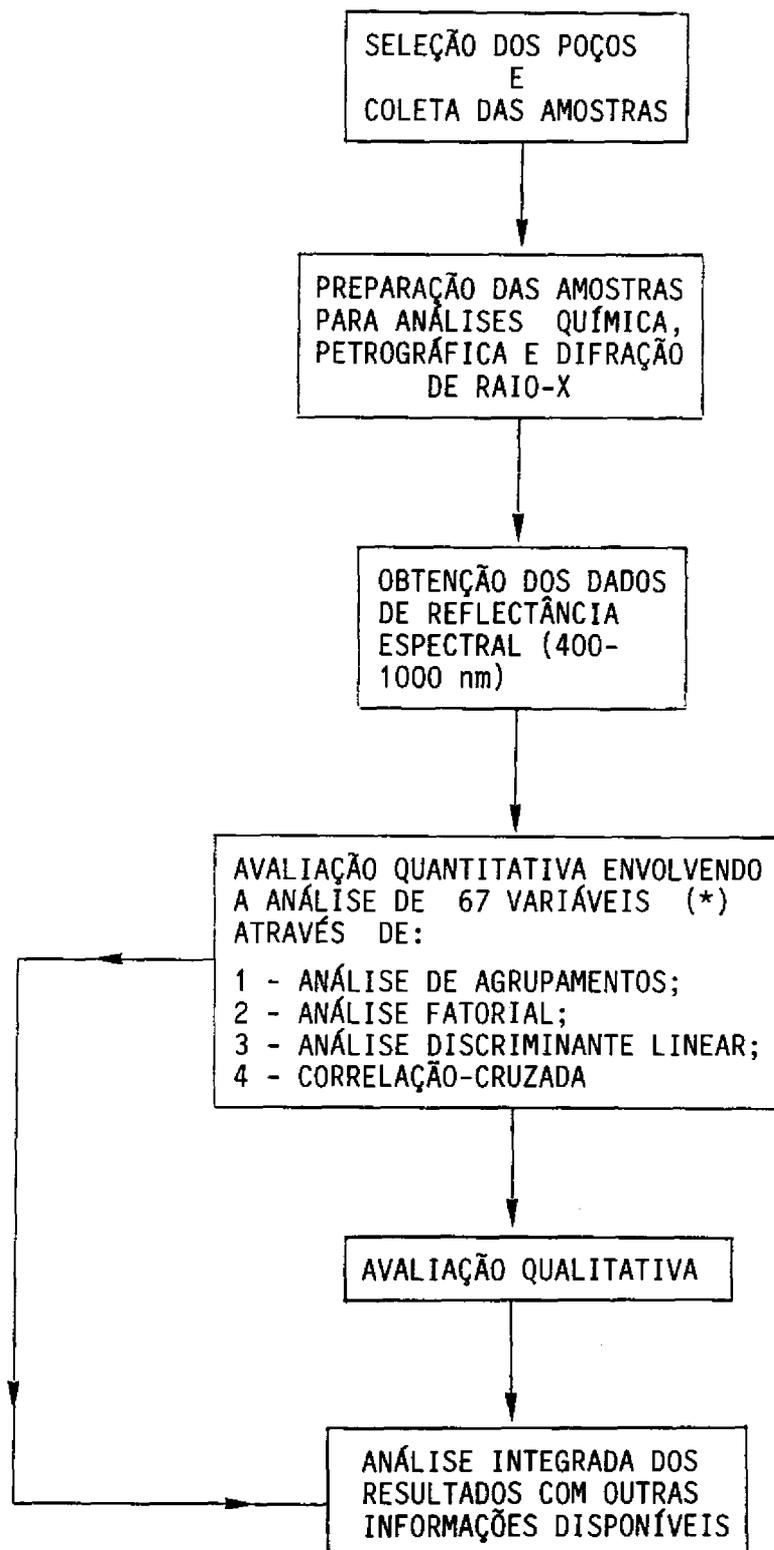


Fig. 4.1 - Metodologia de trabalho adotada para o correlacionamento estratigráfico espectral de poços de perfuração.

- Obs. (*) {
- "Fator de reflectância bidirecional" compreendendo 11 bandas espectrais com 10 nm de largura;
 - Razões de reflectância entre estas bandas;
 - Dados obtidos a partir da primeira derivada dos espectros de reflectância.

Em seguida, os dados da avaliação quantitativa foram julgados qualitativamente, plotando-se as variáveis em função dos diferentes grupos de rochas e analisando o seu desempenho para discriminação litológica.

A análise integrada dos resultados com outras informações disponíveis, tais como observações petrográficas e profundidade de coleta das amostras, foi feita sempre de forma concomitante a obtenção dos dados. Esta análise propiciou a avaliação do desempenho das técnicas estatísticas no processo de correlacionamento, bem como a correção de distorções resultantes de sua aplicação.

4.2 - A INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA RESPOSTA ESPECTRAL DAS ROCHAS DA BACIA DO PARNAÍBA

Os seguintes passos foram adotados para atingir este objetivo:

- seleção de 27 amostras, sendo 16 de arenitos e 11 de folhelhos;
- obtenção dos dados de reflectância espectral com o espectrorradiômetro Optronic 740A;
- efetivação de análises química, petrográfica e determinação do conteúdo de carbono orgânico total das amostras;
- pulverização das 27 amostras e obtenção de dados espectrais sobre o material pulverizado;
- análise da correlação entre a reflectância de bandas espectrais estreitas (10 nm de largura) e a composição química das rochas.

4.3 - A INFLUÊNCIA DO INTEMPERISMO NA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DAS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DA BACIA DO PARNAÍBA

Nesta investigação, de caráter preliminar, os seguintes passos foram adotados:

- coleta de amostras de campo representativas de algumas unidades estratigráficas presentes nos poços, procurando-se preservar o aspecto físico do pavimento dos afloramentos;
- obtenção de dados de reflectância em laboratório a partir das faces expostas e não expostas à superfície destas amostras e dos debrís coletados adjacientemente aos afloramentos. O espectrorradiômetro Optronics 740A foi utilizado na aquisição dos dados;
- análise dos resultados em conjunto com observações de campo e informações obtidas anteriormente.

CAPÍTULO 5

O CORRELACIONAMENTO LITOESTRATIGRÁFICO ESPECTRAL DE POÇOS DE PERFURAÇÃO

5.1 - SELEÇÃO DOS POÇOS E COLETA DAS AMOSTRAS

O processo de seleção dos poços foi feito em função da disponibilidade dos mesmos e das condições de preservação de seus testemunhos. Foram selecionados para estudo 4 poços: Testa Branca (1-TB-1-MA), Mangabeiras (1-MS-1-MA), Barão de Grajaú (2-BGst-1-MA) e Floriano (1-FL-1-PI). Eles situam-se nas proximidades dos limites dos Estados do Piauí e Maranhão (Fig. 5.1). Apenas a seqüência paleozóica da bacia foi atravessada por todos eles, conforme mostra a Fig. 5.2, embora tenha-se ignorado inicialmente a distribuição das seqüências estratigráficas em cada poço para efeito de coleta das amostras.

Foram coletadas 53 amostras com a seguinte distribuição por poço: Testa Branca (19), Mangabeiras (19), Floriano (11) e Barão de Grajaú (4). Apenas as litologias mais representativas, em termos de domínio espacial dos testemunhos, foram amostradas. Das 53 amostras, 27 foram escolhidas para efetivação de análises químicas e petrográficas. Das unidades argilosas, foram escolhidas 06 amostras para difração de raio-X.

De maneira geral, todas elas foram coletadas na forma de discos com 10 cm de diâmetro e cerca de 2 centímetros de espessura.

As amostras foram serradas para que uma de suas faces mantivesse um aspecto plano ou liso, enquanto a outra preservasse o aspecto rugoso de sua superfície.

5.2 - A OBTENÇÃO DO FATOR DE REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL (FRB)

No presente trabalho, o espectrorradiômetro Optronics 740A foi utilizado para a obtenção dos dados de reflectância. Na literatura,

pode-se destacar o trabalho de Maracci (1978) que o utilizou em campo para estudar a evolução fenológica de culturas de arroz. Uma fonte de iluminação artificial foi utilizada em seu experimento. Ele reconheceu, entretanto, a sua maior adequabilidade para laboratório, em função de sua baixa velocidade de obtenção dos dados.

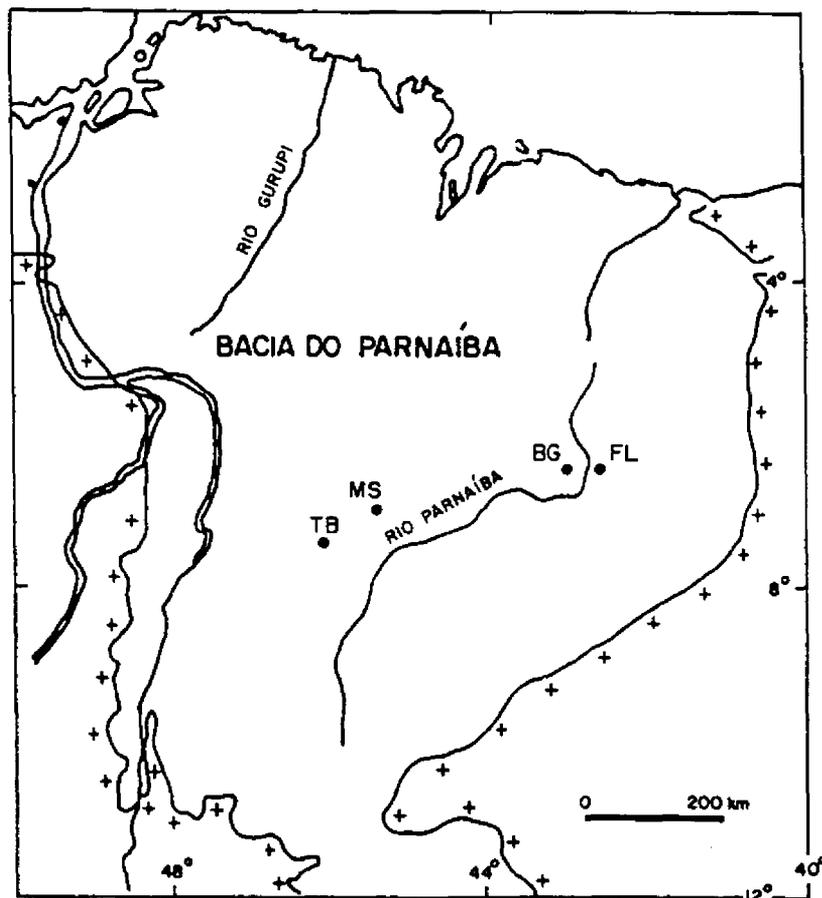


Fig. 5.1 - Localização dos poços Testa Branca (TB), Mangabeiras (MS), Barão de Grajaú (BG) e Floriano (FL).

A Figura 5.3 fornece uma visão geral do equipamento e da estrutura montada no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) para determinação da reflectância espectral de amostras de rochas.

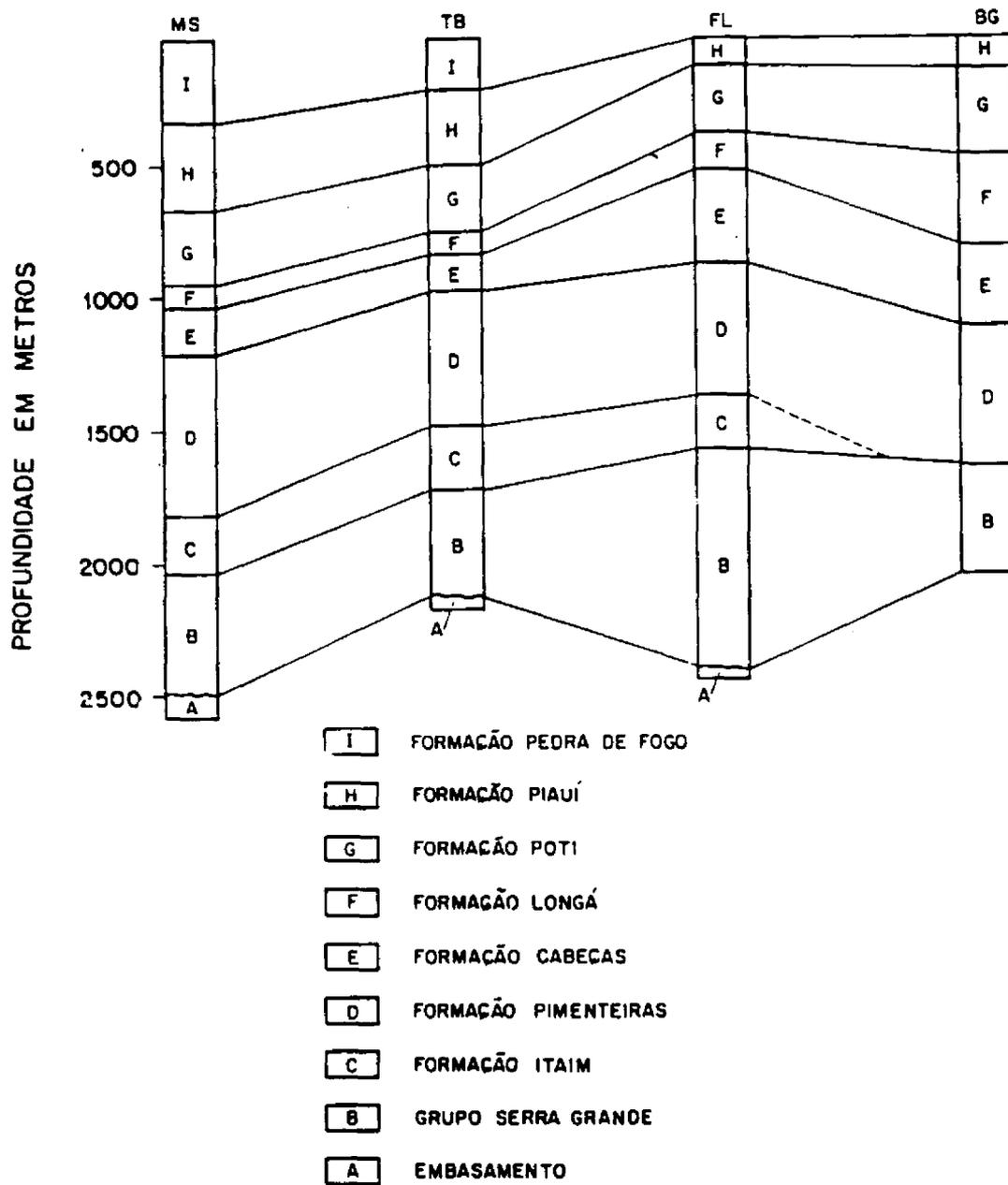


Fig. 5.2 - Unidades litoestratigráficas perfuradas pelos poços Mangabeiras (MS), Testa Branca (TB), Floriano (FL) e Barão do Grajá (BG).

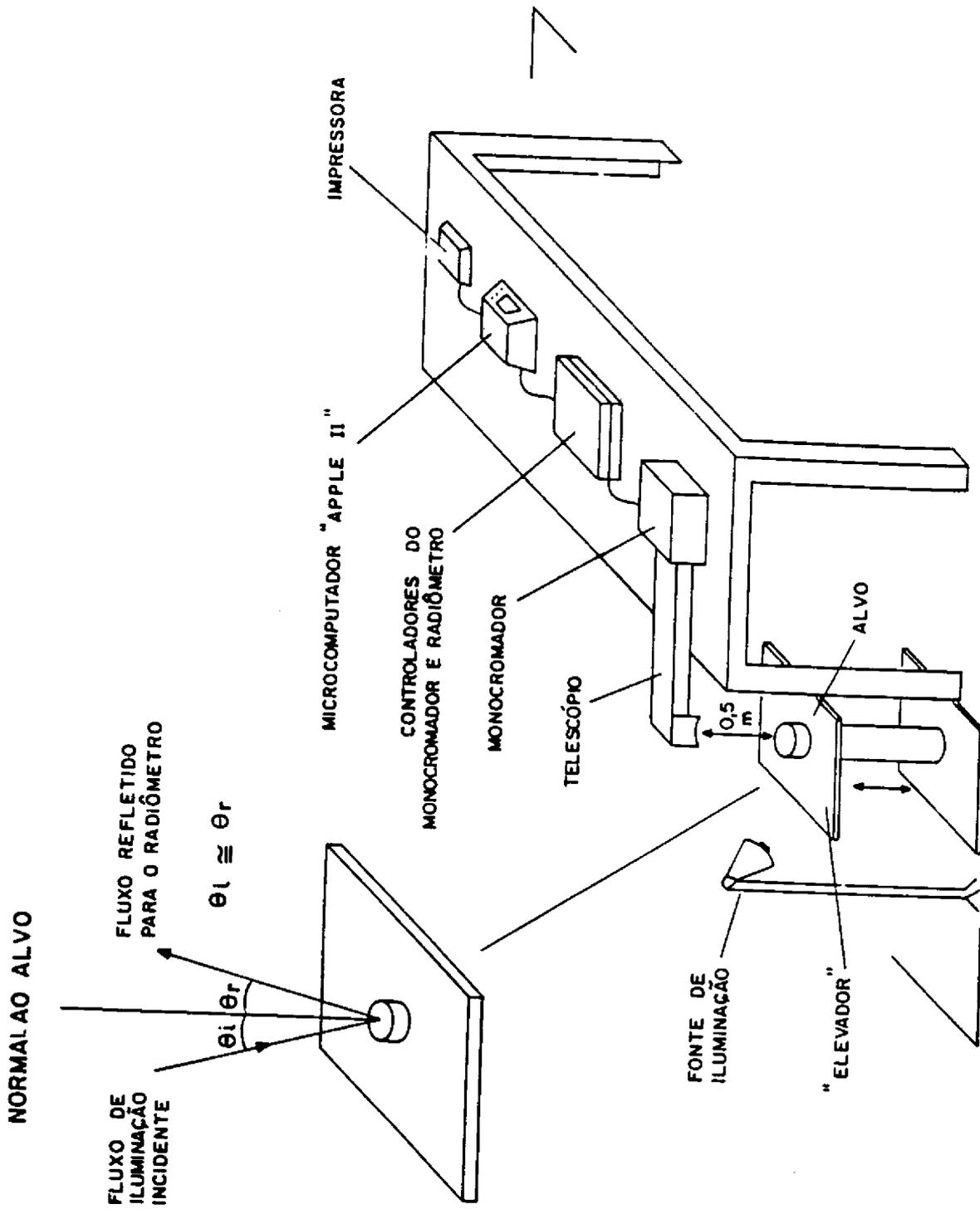


Fig. 5.3 - A obtenção dos dados de reflectância espectral de amostras de rochas com o espectroradiômetro "Optronics".

O sistema Optronics 740A, desenvolvido pelo Optronics Laboratories Inc., é um equipamento versátil, capaz de medir uma grande variedade de quantidades radiométricas e fotométricas. O espectrorradiômetro é composto por um telescópio que coleta a energia refletida pelo alvo, redirecionando-a, através de um espelho, para o plano do monocromador, cuja configuração com dois espelhos côncavos corrige possíveis aberrações. O monocromador propicia a varredura do espectro eletromagnético, na faixa de 250 a 1100 nm, em intervalos espectrais de até 1 nm. A energia refletida pelo alvo sensibiliza um detetor de silício com 1 cm² de área. Todo o sistema é controlado por um microcomputador Apple II, que contém programas para gerar e armazenar os dados, bem como traçar diversos tipos de curvas espectrais. A saída gráfica dos resultados é feita pelo uso de uma impressora (Galvão et al., 1988).

As amostras são posicionadas sobre uma mesa ou elevador, cujo movimento vertical controla a distância entre o sensor e um plano que representa a face superior do alvo (placas de referência ou amostra), tendo em vista as possíveis variações de espessura de uma amostra para outra. A fonte de iluminação utilizada é uma lâmpada de tungstênio de 1000 Watts de potência, disposta perpendicularmente ao plano ou superfície horizontal de medição, a exemplo do próprio sensor, embora o sistema permita variar tal configuração.

As medidas efetivadas no presente trabalho envolveram a obtenção do Fator de Reflectância Bidirecional entre 400 e 1000 nm em intervalos espectrais de 5 nm. De acordo com Milton (1987), pode-se definir o Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) como:

$$\text{FRB} = dL_T/dL_P \cdot K$$

onde dL_T = radiância do alvo;

dL_P = radiância de uma placa padrão de comportamento Lambertiano;

K = fator de correção da placa.

O termo bidirecional neste contexto refere-se a dois ângulos envolvidos: um para a posição da fonte de iluminação e outro para a posição do sensor. As medidas sobre o alvo e a placa são feitas sob as mesmas condições de geometria e visada. O fator de correção da placa (K) é introduzido na equação acima, devido ao fato que superfícies perfeitamente lambertianas não existem na prática. No presente trabalho, o fator K não pode ser calculado por falta de condições experimentais de laboratório. É preciso ressaltar, no entanto, que as diferenças entre as reflectâncias absolutas (com o cálculo de K) e aparente (sem o cálculo de K) são da ordem de $\pm 3\%$ ao longo da faixa 400 a 1000 nm. Na verdade, boa parte dos trabalhos de radiometria para o sensoriamento remoto envolvem comparações relativas entre dados de reflectância aparente dos alvos.

A obtenção da reflectância espectral em intervalos espectrais de 5 nm ou menos constitui uma grande vantagem para a análise dos dados e identificação de feições espectrais sutis, que normalmente são mais largas que 40 nm. Por outro lado, uma das limitações do equipamento é a sua faixa espectral de operação (até 1100 nm). Neste intervalo de comprimento de onda, feições espectrais diagnósticas de alguns minerais e rochas não podem ser detectadas. Um exemplo disto é a banda de absorção carbonática, que normalmente aparece próximo a 2300 nm ou aquelas diagnósticas de argilominerais entre 1400 e 1900 nm.

O processo de obtenção dos dados, referente as 53 amostras coletadas nos poços, foi precedido por uma série de experimentos, tendo em vista três preocupações básicas:

- a possibilidade de variações na leitura dos dados em função do tempo de duração de medidas seqüenciais decorrentes, por exemplo, de uma possível instabilidade da fonte de iluminação ou de limitações da parte eletrônica do espectrorradiômetro;
- a necessidade de definir uma distância entre o plano de medição e o sensor, tendo em vista a relação diâmetro das amostras (10 cm) versus "field-of-view" (FOV) inicialmente desconhecida;

- escolha de uma superfície da placa padrão adequada às condições do experimento.

Com relação ao primeiro aspecto, algumas seqüências de medidas foram feitas sobre uma placa de BaSO_4 de 15 cm de diâmetro. A duração máxima dos experimentos foi de 6 horas, tendo normalmente usado na aquisição posterior dos dados. Analisando a média e o desvio padrão das leituras para cada comprimento de onda, não foram observados indícios de variações significativas em função do tempo de duração do experimento.

No que se refere ao segundo aspecto, calculou-se a reflectância de uma placa de BaSO_4 de 10 cm de diâmetro (placa A) em relação a outra com 15 cm (placa B), variando-se a distância das placas ao sensor. Foi utilizado como revestimento de fundo do piso do "elevador" um pano preto de baixa refletividade no visível, porém com alta reflectância no infravermelho. Observando a Fig. 5.4, pode-se concluir que a distância de 0,5 m, dentre as quatro, é a que mostra menor influência do efeito de vizinhança do alvo. Nesta distância, o alvo preenche por completo o campo de visada do sensor. À medida que ela aumenta, a alta reflectância do fundo no infravermelho passa a predominar e a reflectância da placa no visível tende a baixar, mascarando a obtenção dos dados.

A escolha da superfície padrão para fins do presente trabalho foi um aspecto curioso. Inicialmente, foi utilizada uma placa onde BaSO_4 foi borrifado sobre uma base. Entretanto, o uso de uma fonte de iluminação potente aquecia o ambiente de medida, requerendo o uso de um ventilador que rapidamente removia partículas da superfície da placa, alterando as suas características radiométricas. A opção encontrada foi confeccionar um padrão, oriundo da decantação de BaSO_4 imerso em álcool. O desempenho radiométrico desta placa é similar à obtida pela borrifação, tendo a vantagem de ser mais resistente em experimentos de laboratório e de dificultar a aderência de sujeiras. Um diâmetro de 10 cm, igual aos das amostras de rochas, foi escolhido para normalizar possíveis efeitos de vizinhança do alvo.

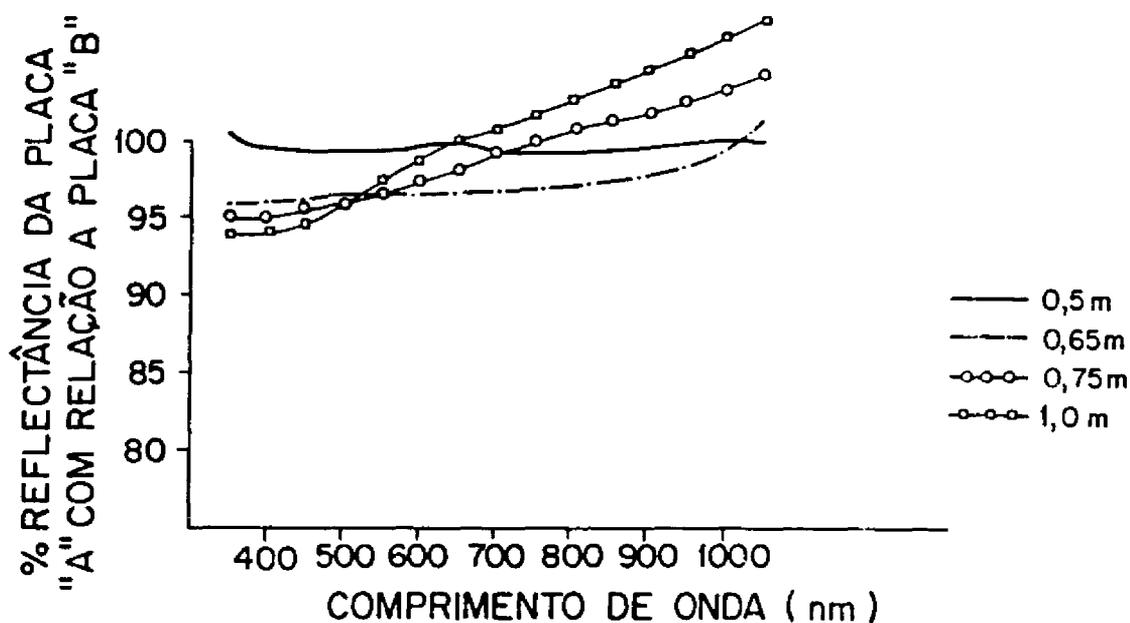


Fig. 5.4 - Efeito da vizinhança do alvo em função da distância do sensor ao plano das placas.

Comentou-se no item anterior o fato das amostras terem sido serradas durante o processo de coleta. O objetivo era investigar se havia modificações significativas nos espectros de reflectância das faces lisas e rugosas, em função das variações no aspecto físico das suas superfícies. Por isso, o processo de coleta de dados espectrais envolveu a obtenção da reflectância média a partir da varredura de três medidas para cada face de amostra. As curvas espectrais resultantes, como um todo, não mostraram diferenças marcantes. Há apenas uma leve tendência das faces lisas serem mais refletoras, principalmente para os arenitos. As exceções são provavelmente devidas a variações na composição química e/ou mineralógica das faces analisadas e, para alguns casos, ao efeito de reflexão especular associado às faces lisas de amostras muito claras e com textura fina. Portanto, de um ponto de vista prático não há necessidade aparente de serrá-las para fins similares ao deste trabalho.

5.3 - AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DOS DADOS

5.3.1 - AQUISIÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA ANÁLISE

Após a obtenção dos dados de reflectância bidirecional com o Optronic 740A, partiu-se para a escolha e extração das variáveis, correspondentes a cada amostra de rocha, a utilizar no processo de discriminação litológica dos poços. Optou-se pelo uso de 67 variáveis, relacionadas na Tabela 5.1, compreendendo:

- 11 bandas espectrais com 10 nm de largura;
- todas as possíveis razões de bandas, não considerando as permutações. Estes índices são importantes para realçar pequenas diferenças espectrais entre as litologias;
- o comprimento de onda equivalente ao ponto de inflexão característico das feições espectrais, caracterizadas por um rápido decréscimo da reflectância, a partir de 800 nm, em direção ao azul. Estas feições estão relacionadas com a presença de ferro nas amostras.

O posicionamento espectral de cada banda foi feito em função de dois critérios: o conhecimento da literatura e uma cuidadosa inspeção visual das curvas espectrais. O valor médio da reflectância em cada intervalo de 10 nm foi usado.

Os dados obtidos a partir da primeira derivada dos espectros de reflectância ($d_{FRB}/d\lambda$) foram úteis para a aquisição do comprimento de onda equivalente ao ponto de inflexão das feições espectrais discutidas acima. A decisão da inclusão desta variável foi feita em função da análise destes dados, que evidenciou a tendência do ponto de inflexão variar conforme o tipo litológico analisado. A Fig. 5.5 ilustra a curva de reflectância espectral de um arenito do Poço Floriano (Am FL08) e o espectro derivativo correspondente mostrando o ponto de inflexão situado em 725 nm.

TABELA 5.1

VARIÁVEIS ESCOLHIDAS PARA ANÁLISE QUANTITATIVA

VARIÁVEIS	
1	BANDA 1 - 400 - 410 nm
2	2 - 425 - 435 nm
3	3 - 445 - 455 nm
4	4 - 495 - 505 nm
5	5 - 545 - 555 nm
6	6 - 595 - 605 nm
7	7 - 645 - 655 nm
8	8 - 745 - 755 nm
9	9 - 795 - 805 nm
10	10 - 895 - 905 nm
11	11 - 980 - 990 nm
12	RAZÕES DE BANDAS - 11/1
13	11/2
14	11/3
15	11/4
16	11/5
17	11/6
18	11/7
19	11/8
20	11/9
21	11/10
22	10/1
23	10/2
24	10/3
25	10/4
26	10/5
27	10/6
28	10/7

(continua)

Tabela 5.1 - Continuação.

	VARIÁVEIS
29	RAZÕES DE BANDAS - 10/8
30	10/9
31	9/1
32	9/2
33	9/3
34	9/4
35	9/5
36	9/6
37	9/7
38	9/8
39	8/1
40	8/2
41	8/3
42	8/4
43	8/5
44	8/6
45	8/7
46	7/1
47	7/2
48	7/3
49	7/4
50	7/5
51	7/6
52	6/1
53	6/2
54	6/3
55	6/4
56	6/5
57	5/1
58	5/2

(continua)

Tabela 5.1 - Conclusão.

VARIÁVEIS	
59	RAZÕES DE BANDAS - 5/3
60	5/4
61	4/1
62	4/2
63	4/3
64	3/1
65	3/2
66	2/1
67	PONTO DE INFLEXÃO - PI (nm)

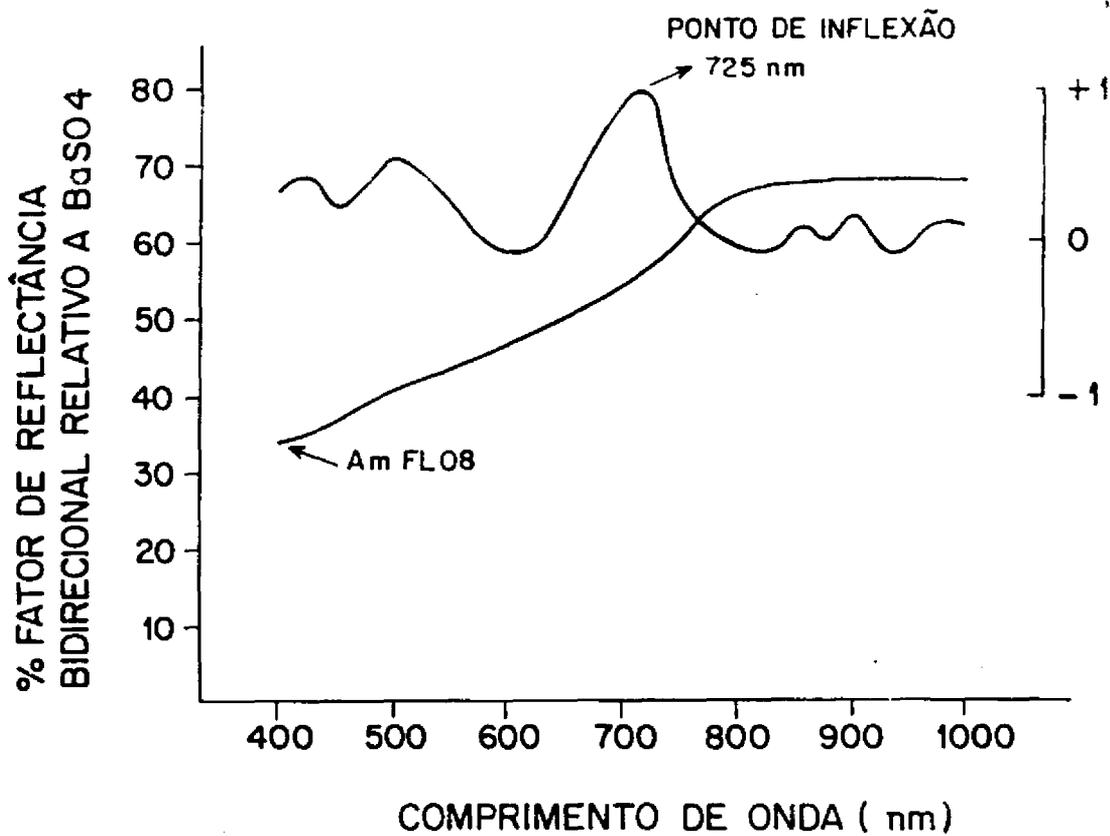


Fig. 5.5 - Curva de reflectância espectral obtida com o Optronic 740A e espectro derivativo correspondente com valores normalizados.

Cada uma das 53 amostras, portanto, foi caracterizada em termos de 67 variáveis.

5.3.2 - A DEFINIÇÃO DE GRUPOS DE AMOSTRAS EM CADA POÇO

Como havia necessidade de verificar se os dados espectrais refletiam algum tipo de estrutura, no sentido que eles podiam conter grupos bem definidos, aplicou-se uma Análise de Agrupamentos ("Cluster Analysis")(Apêndice A).

A avaliação quantitativa da discriminação espectral nos poços requer a definição a priori dos grupos de rochas considerados. Neste contexto, a Análise de Agrupamentos surgiu como uma forma de embasar a subjetividade da definição destes grupos em função do uso apenas, por exemplo, das características petrológicas das amostras.

A utilização de um grande número de variáveis para Análise de Agrupamentos pode obscurecer a separação aparente entre grupos (Anderberg, 1973). Em muitos casos, é adequado reduzir de algum modo o número de variáveis para cada amostra, antes de aplicar qualquer técnica de agrupamento (Everitt et al., 1971; Everitt, 1980). Por isso mesmo, efetivou-se uma análise das Principais Componentes sobre os dados de cada poço, calculando-se os escores equivalentes aos primeiros autovetores obtidos a partir de uma matriz de correlação.

Uma técnica hierárquica aglomerativa ("Group Average Clustering") foi então aplicada para os poços Testa Branca e Mangabeiras, lançando mão dos escores como dados de entrada. Para os poços Floriano e Barão de Grajaú, devido ao pequeno número de amostras coletadas, a simples inspeção visual das curvas e dos aspectos petrológicos das amostras foi suficiente para a definição dos grupos. A medida de dissimilaridade usada foi a distância Euclidiana.

A Fig. 5.6 ilustra a projeção dos escores sobre os dois primeiros eixos principais componentes para as 19 amostras do poço Testa

Branca. A Fig. 5.7 mostra o dendograma resultante da aplicação da Análise de Agrupamentos neste poço. Foram utilizados os escores equivalentes aos primeiros quatro autovetores, responsáveis por cerca de 97% da variância dos dados. Em ambas as Fig. 5.6 e 5.7, as amostras estão numeradas seqüencialmente da base (amostra 01) para o topo do poço (amostra 19).

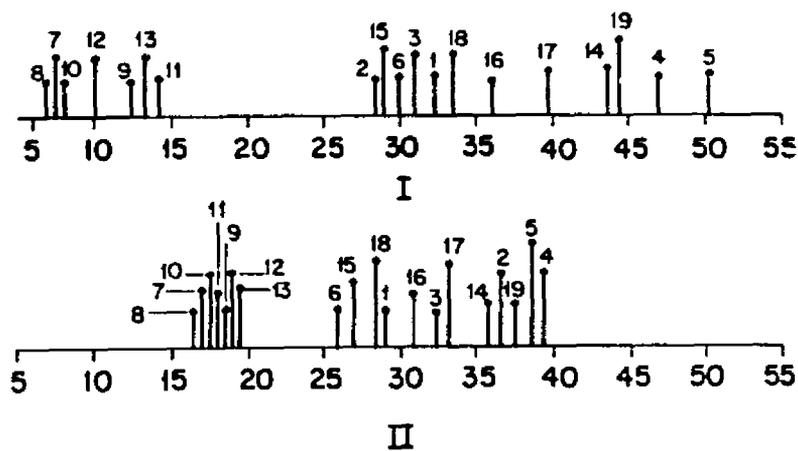


Fig. 5.6 - Projeção dos escores sobre os dois primeiros eixos principais componentes para as 19 amostras do poço Testa Branca.

- A variância ao longo da componente I é 50%.
- A da componente II é 40%.

Observando apenas as Fig. 5.6 e 5,7, duas conclusões são óbvias:

- a formação de dois grandes grupos, cuja maioria das amostras compreendem duas classes distintas de rochas: arenosas e argilosas. As duas únicas amostras de anidrita (18 e 19) foram agrupadas junto com os arenitos;
- a tendência da formação de subgrupos nas duas classes, como os definidos, por exemplo, pelas amostras 7/8/10, ou pelas amostras 4/5 e 1/2/3, aspectos estes um pouco mais claros na Fig. 5.6.

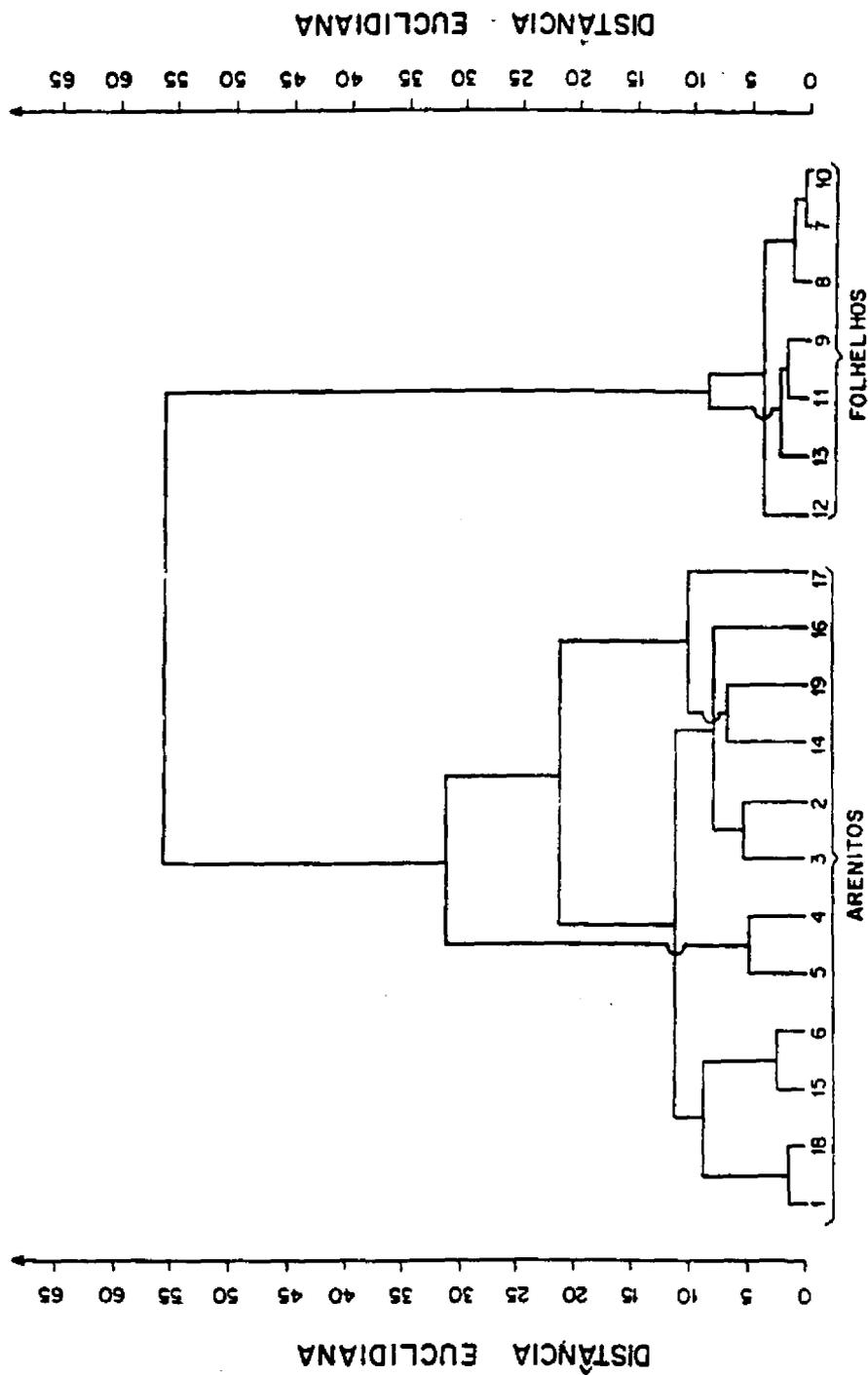


Fig. 5.7 - Dendrograma para as 19 amostras do poço Testa Branca resultante da aplicação da Análise de Agrupamentos ("Group Average").

De um ponto de vista matemático, decidir sobre o número de grupos existentes nestes dados é difícil. Entretanto, o uso da Análise de Agrupamentos requer a participação ativa do analista para interpretar os resultados e julgar sua significância (Anderberg, 1973). Embora este processo seja intuitivo ou subjetivo, ele é necessário para corrigir as distorções resultantes.

De um ponto de vista prático, a análise das diferenças entre os sucessivos nós do dendograma e das projeções dos escores sobre os eixos principais componentes foi enormemente facilitada, quando associou-se a estes dados informações sobre a profundidade de coleta das amostras e de seus aspectos petrológicos. Desta maneira, conforme observado na Fig. 5.7, uma amostra do topo do poço (amostra 18) não deve ser agrupada com outra da base (amostra 01), inclusive porque têm composições litológicas diferentes (anidrita maciça/arenitos esbranquiçados com textura média), embora espectralmente isto seja possível de ocorrer. Por outro lado, deve-se agrupar a amostra 01 com a de número 03, e conseqüentemente com a 02, conforme indica a Fig. 5.6, por terem a mesma característica litológica e estarem aproximadamente na mesma seqüência estratigráfica.

Esta mesma linha de raciocínio foi aplicada para o poço Mangabeiras, mas os resultados obtidos, a partir da Análise de Agrupamentos, foram inferiores aos verificados para o poço Testa Branca, devido a maior variação dos padrões de reflectância de suas amostras. Foram definidos assim, os seguintes grupos de litologia por poço: 6 (Testa Branca), 6 (Mangabeiras), 4 (Floriano) e 2 (Barão de Grajaú). As Tabelas 5.2 a 5.9 fornecem um sumário petrológico e a composição química, incluindo conteúdo de carbono orgânico total, para estes grupos. As Figs. 5.8 a 5.11 exibem curvas de reflectância representativas dos grupos de rochas e o posicionamento das 11 bandas espectrais escolhidas para a avaliação quantitativa dos dados. Foram plotadas também, nas Figs. 5.8, 5.10 e 5.11, curvas de reflectância adquiridas por Conel et al. (1978), ao estudarem alterações de rochas associadas com a ocorrência de urânio na bacia Powder River (Wyoming, EUA). Conforme observado nestas figuras, estas curvas são similares às obtidas no contexto da Bacia do Parnaíba.

TABELA 5.2

RESUMO DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X
DOS LITOTIPOS DO POÇO TESTA BRANCA

GRUPO	SUMÁRIO PETROLÓGICO
1	Arenito cinza-esbranquiçado, granulometria variando de fina a média, com grãos subarredondados/subangulosos de contatos lineares a côncavo-convexos. Compõe-se essencialmente de quartzo (85%) e ortoclásio (10%), com presença secundária de argilas e alguns fragmentos de quartzito. Traços de dolomita, óxidos de ferro, muscovita e turmalina podem ser observados. O cimento mostra crescimento secundário de quartzo.
2	Arenito cinza, granulometria de areia muito fina, com grãos angulosos/subangulosos de contatos linear es a côncavo-convexos. Compõe-se essencialmente de quartzo (40%), fragmentos argilosos (40%), microclínio (10%) e plagioclásio (8%), tendo muscovita e alguns fragmentos de rochas ácidas como acessório. Traços de caulinita, zircão/epidoto, óxidos de ferro e turmalina podem ser observados. O cimento mostra crescimento secundário de quartzo.
3	Folhelho escuro, micáceo, com pequenos níveis siltosos. Há presença predominante de ilita sobre clorita, de acordo com dados de difração de raio-x.
4	Folhelho escuro laminado, micáceo, com níveis siltosos, muitas vezes enriquecidos em grãos de quartzo, formando camadas distintas. Presença de quantidades similares de ilita e clorita.
5	Arenito acinzentado, granulometria variando de muito fina a média, com grãos angulosos a subarredondados de contatos pontuais a lineares. Compõe-se essencialmente de quartzo (88%) e ortoclásio (5%), tendo como acessórios microclínio e dolomita. Fragmentos de quartzo arenito/quartzito são observados, a exemplo de traços de opacos e muscovita. A matriz é argilosa e o cimento apresenta dolomita e crescimento secundário de feldspato.
6	Camada maciça de anidrita.

Conel et al. (1978) utilizaram para aquisição dos dados o radiômetro PFRS ("Portable Field Reflectance Spectrometer") desenvolvido pelo "Jet Propulsion Laboratory". A presença de algumas feições espectrais nas curvas será discutida no Capítulo 6.

TABELA 5.3

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CONTEÚDO DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT) PARA
OS GRUPOS LITOLÓGICOS DO POÇO TESTA BRANCA

GRUPO	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₃ %	Cu ppm	PbO %	Zn ppm	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	C.O.T. %
1	95,01	2,26	0,07	0,07	0,05	1,21	0,73	0,06	-10,0	0,01	20,0	0,08	0,14	0,03
2	88,35	5,78	1,46	0,13	0,22	1,83	0,78	0,03	10,0	0,01	20,0	0,09	0,38	0,04
3	59,59	16,13	8,15	0,43	1,66	0,95	7,02	0,03	10,0	0,01	120,0	0,22	0,38	0,53
4	69,78	14,0	1,88	10,34	1,99	0,58	6,0	0,07	20,0	0,01	100,0	0,22	1,34	0,88
5	91,0	3,06	1,46	1,25	0,28	0,20	1,28	0,14	10,0	0,01	40,0	0,05	0,16	0,05
6	Anidrita (CaSO ₄) - 100%													
	-													

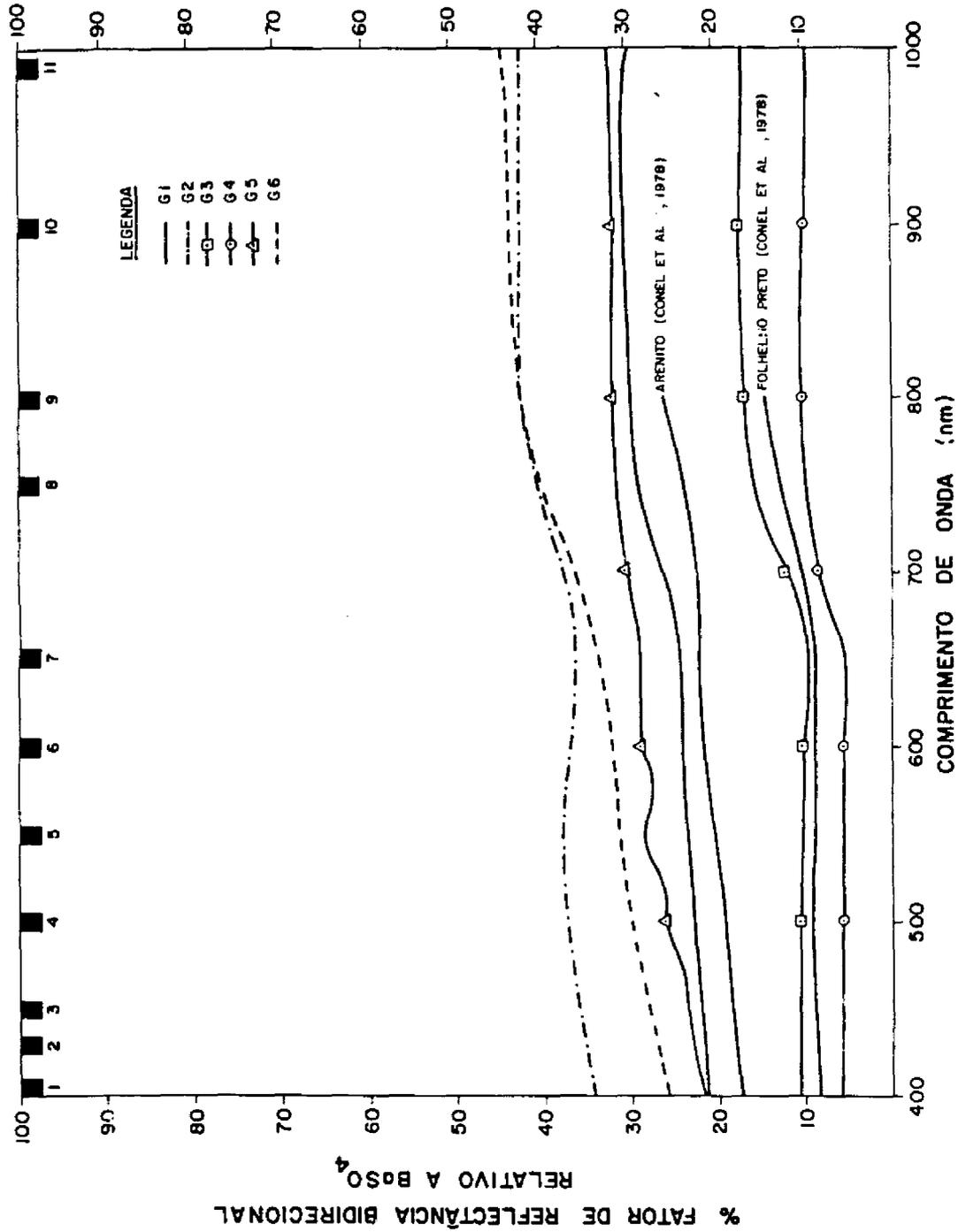


Fig. 5.8 - Curvas de reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Testa Branca. - Os dados foram obtidos em laboratório com o espectrorradiômetro Optronic 740 A. O posicionamento das 11 bandas espectrais utilizadas no trabalho é mostrado na parte superior do gráfico.

TABELA 5.4

RESUMO DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X
DOS LITOTIPOS DO POÇO MANGABEIRAS

GRUPO	SUMÁRIO PETROLÓGICO
7	Arenito cinza esbranquiçado, granulometria de areia média, com grãos subangulosos/subarredondados de contatos lineares a côncavo-convexos. Compõe-se essencialmente de quartzo (65%), argilas (26%) e ortoclásio (5%). Caulinita e fragmentos de quartzo arenito/quartzito, além de traços de micas e zircão também podem ser observados. A matriz é argilosa e o cimento mostra crescimento secundário de quartzo.
8	Arenito acinzentado, granulometria fina a muito fina, com grãos subangulosos/angulosos de contatos lineares a côncavo-convexos. Compõe-se essencialmente de quartzo (60%), fragmentos argilosos (16%) e plagioclásio (15%), tendo microclínio, anidrita, dolomita e caulinita como minerais acessórios. Traços de micas, óxidos de ferro e zircão/epidoto são observados. O cimento apresenta crescimento secundário de quartzo, dolomita e anidrita.
9	Folhelho escuro, micáceo, com níveis silteosos. Há presença de illita, clorita e de illita/esmectita interestratificadas.
10	Arenito acinzentado, granulometria de areia fina a média, com grãos subangulosos/subarredondados de contatos lineares a côncavo-convexos, eventualmente disruptos. Compõe-se essencialmente de quartzo (70%), dolomita (10%), ortoclásio (8%), plagioclásio (5%) e microclínio (5%), tendo caulinita como mineral acessório. Micas e óxidos de ferro ocorrem como traços. O cimento mostra dolomita e crescimento secundário de quartzo e feldspato.
11	Folhelho cinza-claro com pequenos nódulos de fosfato e concentrações prováveis de óxido de ferro, formando pequenos nódulos orientados. Raros fragmentos micáceos também orientados podem ser observados. Clorita mais interestratos de clorita/esmectita, illita/esmectita e illita foram evidenciadas através de difração de raio-x.
12	Camada maciça de anidrita.

TABELA 5.5

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CONTEÚDO DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL (C.O.T.) PARA
OS GRUPOS LITOLÓGICOS DO POÇO MANGABEIRAS

GRUPO	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₃ %	Cu ppm	PbO %	Zn ppm	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	C.O.T. %
7	96,05	1,48	0,38	0,03	0,06	0,06	0,61	0,07	-10,0	0,03	100,0	0,05	0,11	0,03
8	90,58	3,57	1,06	1,07	0,17	1,16	0,82	0,03	-10,0	0,01	50,0	0,08	0,15	0,06
9	61,24	17,59	3,63	0,19	1,83	1,51	5,53	0,07	50,0	0,01	200,0	0,23	0,92	1,10
10	71,81	6,15	2,75	7,74	0,39	0,42	1,92	0,09	10,0	0,01	150,0	0,08	0,17	0,02
11	32,10	4,56	0,76	15,65	14,02	0,87	2,21	0,06	20,0	0,03	130,0	0,18	0,15	0,29
12	Anidrita (CaSO ₄) - 100%													

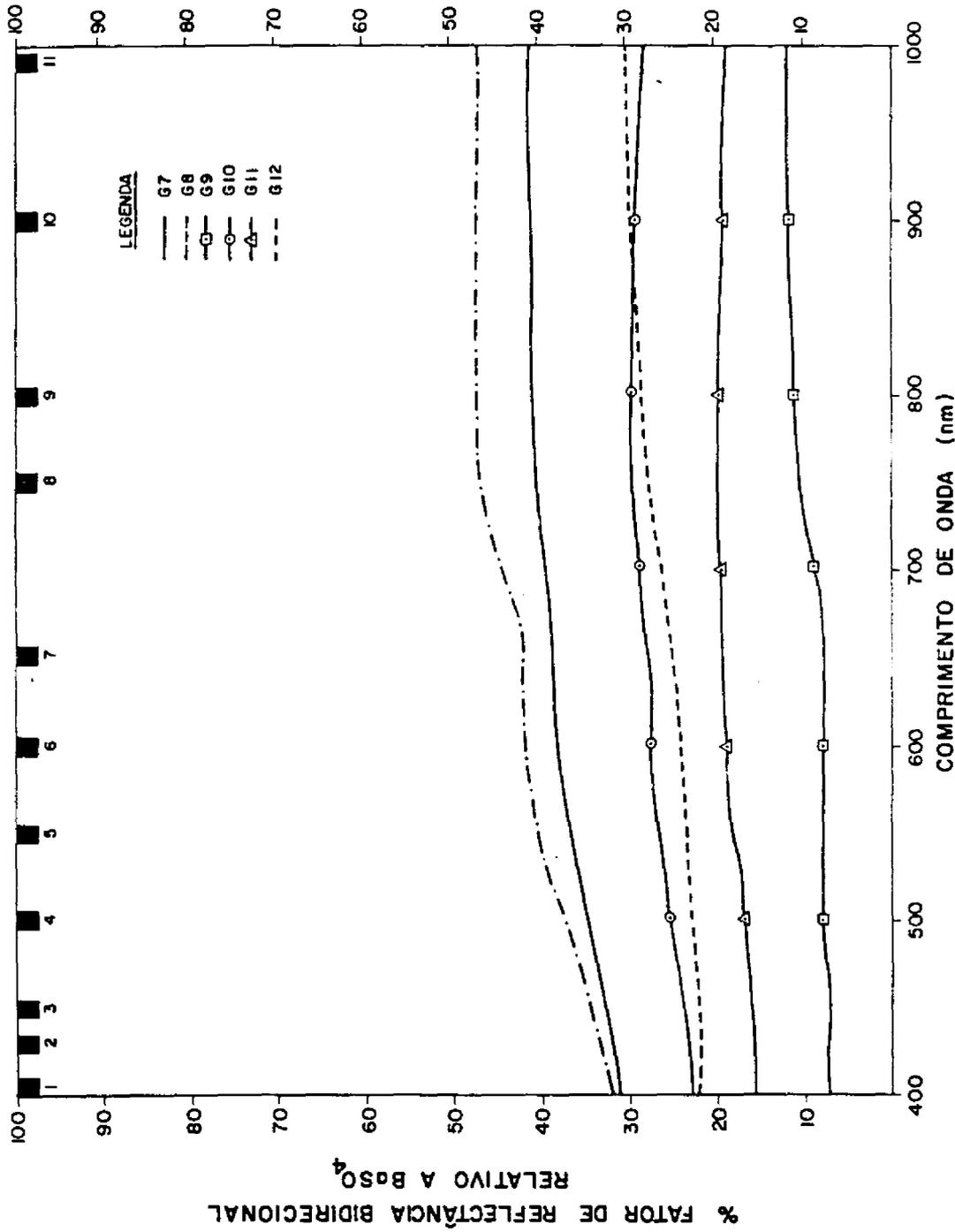


Fig. 5.9 - Curvas de reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Mangabeiras.
 - Os dados foram obtidos em laboratório com o espectrorradiômetro Optronics 740
 A. O posicionamento das 11 bandas espectrais utilizadas no trabalho é mostrado na parte superior do gráfico.

TABELA 5.6

RESUMO DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X
DOS LITOTIPOS DO POÇO BARÃO DE GRAJAÚ

GRUPO	SUMÁRIO PETROLÓGICO
13	Folhelho escuro, micáceo, com níveis de siltito argiloso. Iilita predomina sobre clorita.
14	Arenito cinza claro, granulometria variando de silte grosso a areia muito fina, com grãos subangulares a subarredondados de contatos disruptos/pontuais. Compõe-se essencialmente de quartzo (77%), dolomita (10%), feldspato potássico (5%) e plagioclásio (5%). Presença de argilas (caulinita?) e de traços de biotita/muscovita, zircão e opacos. O cimento apresenta dolomita e caulinita.

5.3.3 - A REDUÇÃO DA DIMENSIONALIDADE DOS DADOS

Definidos os grupos de amostras, cada uma delas caracterizada por 67 variáveis, houve necessidade de se obter um subconjunto de variáveis que melhor sumarizasse a informação original, facilitando tratamentos estatísticos subseqüentes. Desta forma, optou-se pela aplicação de uma Análise Fatorial sobre o conjunto total de dados. Ela é considerada uma extensão da análise das Principais Componentes, possuindo, no entanto, um modelo melhor elaborado (Joreskog et al., 1976).

O propósito essencial da Análise Fatorial é descrever, se possível, as relações de covariância existentes entre um grande número de variáveis em termos de um pequeno número de fatores interdependentes. Estes fatores normalmente contêm a mesma quantidade de informação do amplo conjunto de observações originais (Harman, 1970). De forma simplificada, a idéia é agrupar as variáveis de acordo com suas correlações. Variáveis pertencentes a um determinado grupo seriam altamente correlacionadas entre si, mas possuiriam uma correlação pequena com aquelas de outro grupo de variáveis. Estas relações entre grupos de variáveis seriam então expressas pelos fatores (Johnson e Wichern, 1982).

TABELA 5.7

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CONTEÚDO DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL (C.O.T.) PARA
OS GRUPOS LITOLÓGICOS DO POÇO BARÃO DE GRAJAU

GRUPO	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₃ %	Cu ppm	PbO %	Zn ppm	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	C.O.T. %
13	75,20	11,73	1,73	0,29	1,12	2,20	4,03	0,04	40,0	-0,01	80,0	0,21	0,58	0,38
14	70,16	6,56	3,07	4,49	3,43	1,83	2,11	0,25	10,0	0,01	60,0	0,10	0,42	0,04

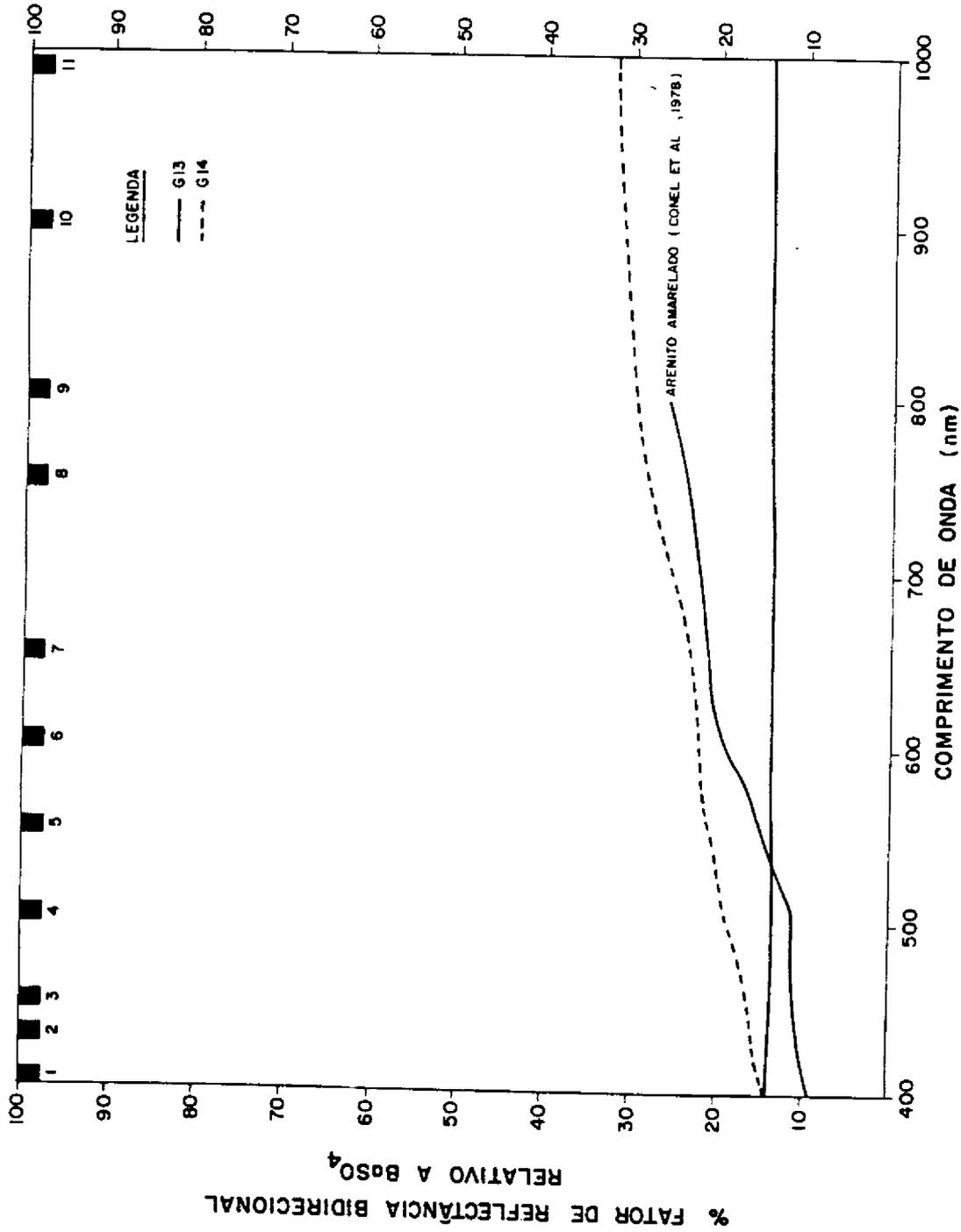


Fig. 5.10 - Curvas reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Barão de Grajau.

- Os dados foram obtidos em laboratório com o espectrorradiômetro Optronic 740 A. O posicionamento das 11 bandas espectrais utilizadas no trabalho é mostrado na parte superior do gráfico.

TABELA 5.8

RESUMO DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS E DIFRAÇÃO DE RAIOS-X
DOS LITOTIPOS DO POÇO FLORIANO

GRUPO	SUMÁRIO PETROLÓGICO
15	Arenito cinza claro, granulometria variando de areia média a fina, com grãos subangulares a subarredondados de contatos lineares a côncavo-convexos, eventualmente suturados. É constituído essencialmente por quartzo (63%), microclínio (28%) e ortoclásio (5%), tendo opacos e dolomita como minerais acessórios. Há presença de fragmentos de rochas ácidas e quartzito, além de traços de muscovita, zircão, estauroлита e caulinita. O cimento mostra crescimento secundário de quartzo e feldspato, dolomita e caulinita.
16	Arenito róseo-esbranquiçado, granulometria variando de silte grosseiro a areia muito grossa, com grãos mal selecionados de contato côncavo-convexo a suturado. É constituído essencialmente por quartzo (80%) e feldspato potássico (16%), tendo opacos, anidrita, dolomita e caulinita como minerais acessórios. Traços de fragmentos de rochas vulcânicas foram observados. O cimento exhibe anidrita e crescimento secundário de quartzo.
17	Folhelho cinza-claro laminado com níveis de siltito composto por quartzo, dolomita, argilas, micas, opacos e feldspato. O folhelho contém interestratos de illita/esmectita, illita e clorita, além de traços de caulinita.
18	Arenito acinzentado, granulometria fina a média, com grãos subangulosos de contatos lineares a côncavo-convexos. É constituído essencialmente por quartzo (88%), plagioclásio (6%) e ortoclásio (5%), tendo óxidos de ferro como acessórios. Traços de argilas autigênicas (cloritas?), zircão/epidoto, dolomita e micas são observados. O cimento exhibe crescimento secundário de quartzo.

TABELA 5.9

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CONTEÚDO DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL (C.O.T.) PARA
OS GRUPOS LITOLÓGICOS DO POÇO FLORIANO

GRUPO	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₃ %	Cu ppm	PbO %	Zn ppm	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	C.O.T. %
15	90,47	4,12	1,61	0,35	0,16	1,04	0,54	0,05	10,0	-0,01	120,0	0,06	0,23	0,02
16	87,20	4,51	0,11	1,24	0,42	2,68	2,09	0,08	10,0	0,01	140,0	0,09	0,24	0,02
17	70,53	12,07	4,54	1,03	1,66	2,16	2,19	0,08	10,0	0,02	170,0	0,13	0,85	0,84
18	95,69	0,91	0,49	0,06	0,15	0,05	1,31	0,04	-10,0	0,01	140,0	0,06	0,64	0,02

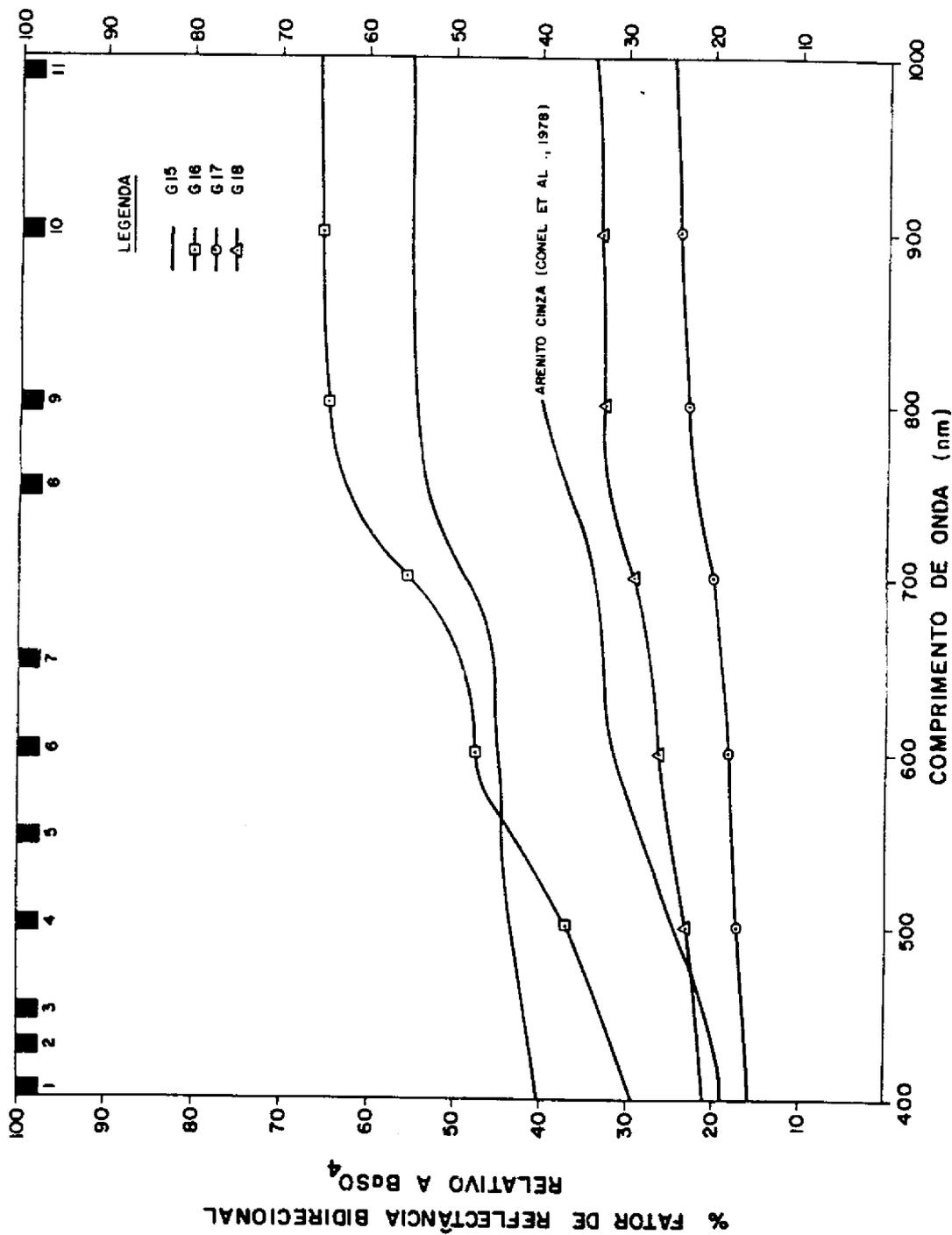


Fig. 5.11 - Curvas de reflectância espectral para os grupos litológicos do poço Floriano.
 - Os dados foram obtidos em laboratório com o espectrorradiômetro Optronic 740
 A. O posicionamento das 11 bandas espectrais utilizadas no trabalho é mostrado na parte superior do gráfico.

O programa FACTOR (Burroughs, 1975), que utiliza o método Principal-Fator, foi usado no presente trabalho. Em suma, os cálculos iniciam com a obtenção das principais componentes a partir de uma matriz de correlação, convertendo-as em fatores que são subseqüentemente rotacionados pelo critério Varimax (Apêndice B).

A seleção do número de fatores para retenção é um dos principais problemas envolvendo a aplicação da Análise Fatorial. Os diversos critérios existentes na literatura, a maior parte dos quais empíricos, não devem ser aplicados de forma indiscriminada (Johnson e Wichern, 1982). No presente trabalho, a seleção foi feita com base na combinação dos seguintes critérios:

- (a) retenção de todos os fatores com autovalores maior que um (Guttman, 1954);
- (b) extração do número de fatores responsáveis por 95 a 99% da variância total dos dados (Joreskog et al., 1976);
- (c) exame das comunalidades em função da retenção de um número variável de fatores (Harman, 1970);
- (d) exclusão dos fatores com menos de três fatores de peso ("loadings") significativos (Joreskog et al., 1976).

A seleção de 6 fatores para o conjunto de dados espectrais preenche os requisitos dos critérios (a) e (b) (Tabela 5.10), mas não os do (c) e (d). A seleção de 5 fatores é concordante com a exigência de todos os critérios. Um exame das comunalidades para 4, 5, 6 e 7 fatores, evidenciou que as variâncias das 67 variáveis pouco se modificam com a retenção de um número de 6 ou 7 fatores com relação a 5. Esta mesma relação já não é observada com a seleção com 4 fatores que, portanto, não preenche pelo menos dois dos critérios acima discutidos. Desta forma optou-se pela escolha de 5 fatores.

TABELA 5.10

OS 8 PRIMEIROS AUTOVALORES E
% VARIÂNCIA ASSOCIADA

FATOR	1	2	3	4	5	6	7	8
AUTOVALORES	28,97	20,57	6,75	5,06	2,57	1,08	0,88	0,47
% VARIÂNCIA TOTAL	43,24	30,70	10,08	7,56	3,84	1,62	1,32	0,71
% VARIÂNCIA CUMULATIVA	43,24	73,94	84,02	91,58	95,42	97,04	98,36	99,06

A solução pelo método Principal-Fator com 5 fatores rotacionados pelo critério Varimax é dada na Tabela 5.11. Os fatores de peso vistos nesta tabela ou os seus valores elevados ao quadrado são normalmente utilizados para pesar a contribuição de cada variável para o fator estimado. Eles fornecem uma medida de variância da variável diretamente associada com o fator (Rummel, 1970). A inspeção dos fatores de peso em cada coluna da Tabela 5.11 conduz à seguinte interpretação dos fatores:

- (a) **Fator 1** - representa a covariação das razões entre bandas infravermelhas (8 a 11) e visíveis (1 a 7), que representam a maior variância dos dados;
- (b) **Fator 2** - representa a covariância das razões entre bandas do visível (7,6,5/1,2,3,4);
- (c) **Fator 3** - exprime as relações de covariação entre as 11 bandas simples;

TABELA 5.11

MATRIZ FATORIAL ROTACIONADA PELO CRITÉRIO VARIMAX

VARIÁVEIS	FATOR 1	FATOR 2	FATOR 3	FATOR 4	FATOR 5
1	-0,250	0,095	0,955	-0,054	0,026
2	-0,243	0,131	0,954	-0,059	0,029
3	-0,240	0,148	0,953	-0,057	0,030
4	-0,227	0,209	0,946	-0,058	0,031
5	-0,197	0,286	0,934	-0,052	0,022
6	-0,185	0,330	0,922	-0,049	0,017
7	-0,168	0,352	0,917	-0,047	0,015
8	0,040	0,346	0,933	-0,063	-0,000
9	0,078	0,336	0,933	-0,063	0,000
10	0,106	0,327	0,933	-0,061	0,002
11	0,123	0,342	0,925	-0,059	0,004
12	0,842	0,520	0,016	-0,033	0,065
13	0,884	0,454	0,008	-0,020	0,062
14	0,909	0,405	-0,012	-0,019	0,060
15	0,964	0,240	-0,073	-0,011	0,058
16	0,982	0,010	-0,156	-0,010	0,069
17	0,971	-0,126	-0,169	-0,005	0,072
18	0,958	-0,198	-0,169	-0,001	0,075
19	0,489	0,025	0,013	-0,005	0,867
20	0,342	0,097	0,053	-0,009	0,929
21	0,211	0,144	0,071	-0,020	0,954
22	0,785	0,495	0,080	-0,041	0,352
23	0,814	0,431	0,077	-0,030	0,374
24	0,834	0,386	0,060	-0,030	0,383
25	0,970	0,228	-0,044	-0,014	0,056
26	0,988	-0,014	-0,129	-0,012	0,065
27	0,973	-0,156	-0,143	-0,008	0,069
28	0,955	-0,232	-0,141	-0,003	0,071

(continua)

Tabela 5.11 - Continuação.

VARIÁVEIS	FATOR 1	FATOR 2	FATOR 3	FATOR 4	FATOR 5
29	0,859	-0,291	-0,123	0,036	0,115
30	0,028	-0,339	-0,193	0,094	0,140
31	0,806	0,577	0,068	-0,043	0,059
32	0,863	0,510	0,062	-0,029	0,056
33	0,883	0,459	0,040	-0,029	0,054
34	0,956	0,278	-0,027	-0,019	0,050
35	0,987	0,016	-0,125	-0,020	0,062
36	0,974	-0,141	-0,141	-0,015	0,065
37	0,953	-0,224	-0,139	-0,010	0,068
38	0,875	-0,319	-0,152	0,018	0,123
39	0,736	0,659	0,100	-0,044	0,054
40	0,787	0,600	0,096	-0,031	0,049
41	0,824	0,552	0,074	-0,032	0,047
42	0,920	0,373	0,003	-0,023	0,043
43	0,983	0,086	-0,107	-0,027	0,054
44	0,979	-0,098	-0,129	-0,023	0,058
45	0,958	-0,196	-0,127	-0,018	0,061
46	0,086	0,961	0,230	-0,002	0,059
47	0,080	0,962	0,250	0,017	0,047
48	0,084	0,964	0,240	0,014	0,042
49	0,136	0,959	0,202	0,029	0,019
50	0,214	0,896	0,040	0,008	0,021
51	0,437	0,644	-0,049	-0,009	0,029
52	0,026	0,952	0,258	-0,002	0,065
53	0,010	0,952	0,285	0,019	0,052
54	0,023	0,955	0,271	0,015	0,046
55	0,036	0,957	0,253	0,035	0,019
56	0,019	0,963	0,100	0,018	0,018
57	0,010	0,928	0,289	-0,013	0,082
58	-0,010	0,926	0,330	0,011	0,070
59	0,002	0,928	0,324	0,008	0,062

(continua)

Tabela 5.11 - Conclusão.

VARIÁVEIS	FATOR 1	FATOR 2	FATOR 3	FATOR 4	I
60	0,026	0,921	0,331	0,030	
61	0,027	0,199	0,131	-0,966	(
62	0,016	0,076	0,124	-0,988	0
63	0,027	0,001	0,093	-0,993	0,
64	0,037	-0,031	0,056	-0,995	0,
65	0,023	-0,176	0,039	-0,980	-0,1
66	0,049	-0,109	0,021	-0,991	-0,0
67	0,320	-0,256	0,064	0,047	-0,1
VARIÂNCIA	38,67	26,82	16,44	8,81	4,68
% VARIÂNCIA CUMULATIVA	38,67	65,50	81,93	90,74	95,42

(d) **Fator 4** - exprime a covariação das razões entre bandas do visível (3,4/1,2,3);

(e) **Fator 5** - salienta as intercorrelações das razões entre bandas infravermelhas (11/8,9,10).

Optou-se pela redução do número de variáveis para um subconjunto de 20. A redução foi feita de acordo com os seguintes passos:

- agrupamento de variáveis por fator de acordo com três classes de fatores de peso (FP) altos.

Ex.: Fator 5 - FP entre 0,85 e 0,90 = v19

FP entre 0,90 e 0,95 = v20 e v21

FP > 0,95 = nenhuma variável

- seleção do número de variáveis por fator, aproximadamente proporcional à sua variância, tomando-se variáveis representativas de cada classe de fatores de peso. A intenção foi eliminar ao máximo variáveis altamente correlacionadas, uma condição ideal para tratamentos estatísticos posteriores. Esta escolha, sempre que possível, levou em conta também a análise das curvas de reflectância espectral para os diversos grupos de rochas;
- análise, à parte, das variáveis com fatores de peso muito baixos em todos os 5 fatores. A intenção era verificar se o fato delas não terem sido expressas em nenhum fator, poderia trazer embutido alguma informação importante para a discriminação espectral dos grupos. Como isto se verificou apenas para duas variáveis (v30 e v67), antes de decidir-se por sua inclusão, optou-se pela plotagem de seus valores originais em função dos grupos litológicos. Neste contexto, ambas foram rejeitadas.

A Tabela 5.12 relaciona as 20 variáveis selecionadas, seguindo esta linha de raciocínio.

5.3.4 - A DISCRIMINAÇÃO ESPECTRAL DOS GRUPOS DE ROCHAS

Duas unidades litológicas são espectralmente discrimináveis se seus valores de reflectância diferirem significativamente pelo menos em alguma porção do espectro (Meneses, 1986). Comparando as curvas espectrais obtidas para duas litologias, pode-se ter uma idéia em qual banda a discriminação é mais provável. Entretanto, este processo torna-se difícil quando um volume maior de dados é envolvido na análise ou sua variação entre classes não é significativa. Isto requer a utilização de técnicas estatísticas de discriminação para facilitar a análise.

TABELA 5.12

SELEÇÃO DO SUBCONJUNTO DE 20 VARIÁVEIS A PARTIR
DA ANÁLISE FATORIAL (MÉTODO PRINCIPAL-FATOR)

	VARIÁVEIS (BANDA OU RAZÃO DE BANDAS)		
	"FP" (0,85 - 0,90)	"FP" (0,91 - 0,95)	"FP" > 0,95
FATOR 1	14(11/3), 33(9/3)	18(11/7), 37(9/7)	16(11/5), 26(10/5) 35(9/5), 36(9/6), 43(8/5)
FATOR 2	-	49(7/4), 55(6/4)	47(7/2), 56(6/5)
FATOR 3	-	-	4(495-505nm), 6(595-605nm), 8(745-755nm), 11(980-990nm)
FATOR 4	-	-	63(4/3), 66(2/1)
FATOR 5	19(11/8)	-	-

A Análise Discriminante Linear é uma técnica adequada para resolver problemas em que as diferenças entre grupos de rochas são relativamente pequenas (Conel et al., 1978; Podwysoki et al., 1983), a exemplo do que ocorre no presente trabalho. O seu objetivo é encontrar uma função linear, a partir de um conjunto de variáveis dependentes, que produza uma significativa diferenciação entre os grupos. Uma vez definida tal função, ela poderá ser utilizada para classificar amostras de origem desconhecida em torno dos mesmos (Rao, 1973; Lachenbruch, 1975; Kendall, 1980) (Apêndice C).

Na literatura, a nível de sensoriamento remoto, vários trabalhos têm demonstrado o bom desempenho da análise discriminante para diferenciação de alvos geológicos com base em dados espectrais. Pode-se citar, como exemplo, os trabalhos de:

- Vincent e Pillars (1974) na discriminação espectral de diversas classes de alvos (minerais, rochas, solos e vegetação);
- Conel et al. (1978) no estudo espectral de alterações de rochas associadas com a ocorrência de urânio;
- Blom et al. (1980) e Wester e Lunden (1986) na diferenciação de diversos tipos de rochas plutônicas;
- Goetz e Rowan (1981) e Rowan e Kahle (1982) para discriminação entre rochas alteradas e não-alteradas;
- Whitney et al. (1983) na discriminação espectral de associações mineralógicas;
- Schwaller (1987) numa investigação geobotânica para a detecção de áreas com concentrações anômalas de cobre.

No Brasil, os trabalhos de Mattos e Vitorello (1982) para discriminação espectral entre calcários e quartzitos sobre imagem MSS, Formaggio (1983) no estudo espectral de solos em Araras (SP) e Meneses (1986) na discriminação espectral de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (BA), constituem bons exemplos de sua aplicação a nível de sensoriamento remoto.

De posse do conjunto de 20 variáveis selecionadas pela análise fatorial, aplicou-se uma análise Função Discriminante Linear neste trabalho com os seguintes objetivos:

- selecionar as 12 melhores variáveis para a discriminação espectral dos grupos;
- obter uma função discriminante a partir destas 12 variáveis e avaliar sua precisão de classificação;

- avaliar a separabilidade espectral dos grupos usando como medida de similaridade a "Distância Generalizada de Mahalanobis".

Para a obtenção de funções discriminantes lineares é necessário que as variáveis utilizadas sejam linearmente independentes, isto é, que nenhuma delas seja um múltiplo exato ou possa ser expressa como uma soma linear de outras. Variáveis formadas por razões de refletância são linearmente independentes, mas obviamente nem todas são funcionalmente independentes (Conel et al., 1978). Por isto, a aplicação da análise discriminante neste trabalho foi precedida pelo uso da técnica principais componentes e exame dos fatores de peso associados ao último autovetor. Desde que ele representa verdadeiramente os resíduos dos dados, fatores de peso diferindo significativamente de zero poderiam expressar o fato acima mencionado, o que na verdade não ocorreu.

Para a seleção das 12 melhores variáveis, utilizou-se o programa Discrim (SAS, 1987) para efetivar-se uma Análise Discriminante Linear sobre o conjunto total das 20 variáveis. Calculou-se então a contribuição relativa de cada variável na discriminação entre pares de grupos, conforme descrito no Apêndice C, ordenando-se as 12 melhores.

Este processo de seleção, entretanto, não leva em conta o fato das variáveis não serem independentes. Ele não considera as relações existentes entre as variáveis selecionadas e aquelas que não têm sido incluídas no modelo (Davis, 1973). Conseqüentemente, algumas variáveis importantes na discriminação dos grupos podem ser excluídas durante o processo de seleção.

Decorrente deste fato, este critério de seleção foi usado apenas para formar um conjunto-base de 12 variáveis, a partir do qual inúmeras tentativas de inclusão e deleção de variáveis foram feitas. Os resultados destas tentativas foram avaliados através da análise da precisão de classificação das observações de acordo com a função gerada.

A melhor função discriminante, no contexto das 12 variáveis, foi obtida com a inclusão das seguintes variáveis: v4 (495-505 nm), v14 ($R_{11/3}$), v16 ($R_{11/5}$), v19 ($R_{11/8}$), v26 ($R_{10/5}$), v35 ($R_{9/5}$), v36 ($R_{9/6}$), v43 ($R_{8/5}$), v47 ($R_{7/2}$), v49 ($R_{7/4}$), v56 ($R_{6/5}$) e v63 ($R_{4/3}$). A ordenação destas variáveis, em função de sua importância no processo discriminante, será discutida no item 5.4.

Os resultados do desempenho desta função para a classificação das 53 amostras de rochas, coletadas nos 4 poços de perfuração, são mostrados na Tabela 5.13. Os bons resultados obtidos não são devido apenas ao número de variáveis utilizadas, mas em muito aos intervalos espectrais estreitos usados para a aquisição dos dados e extração das variáveis. Isto pode ser evidenciado comparando-se estes resultados com os da Tabela 5.14, que mostra a matriz de classificação resultante da aplicação de uma análise discriminante sobre variáveis simulando as bandas do TM/Landsat-5. As variáveis utilizadas compreenderam a refletância média das bandas 1 (450-520 nm), 2 (520-600 nm), 3 (630-690 nm), 4 (760-900 nm) e suas razões (4/1, 4/2, 4/3, 3/1, 3/2, 2/1). A classificação das observações melhorou quando a razão 2/1 foi descartada da análise, mas a precisão média da classificação vista na Tabela 5.14 ainda é inferior aos resultados obtidos com bandas estreitas (Tabela 5.13).

Para avaliar a significância estatística dos resultados, efetivou-se uma análise multivariada de variância (MANOVA). A hipótese H_0 de que o vetor-média dos grupos são iguais foi testada por 4 estatísticas multivariadas (Wilks Lambda, Traço de Pillai, Traço Hotelling-Lawley e Raiz maior de Roy), com valores numéricos convertidos para um F aproximado, conforme discutido por SAS (1987). A Tabela 5.15 ilustra os resultados para o caso de bandas estreitas. Pode-se verificar, de acordo com esta tabela, que os testes multivariados para diferenças entre classes são significativos ao nível de 0,0001.

TABELA 5.13
MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO OBTIDA A PARTIR DE UMA ANÁLISE DISCRIMINANTE
ENVOLVENDO 12 VARIÁVEIS ESPECTRAIS

GRUPOS*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	PRECISÃO DE CLASSIFICAÇÃO (%)
1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
5	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	75
6	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
7	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
9	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	75

(continua)

Tabela 5.13 - Conclusão.

GRUPOS*	PRECISÃO DE CLASSIFICAÇÃO (%)																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	PRECISÃO MÉDIA (x)																	
	96																	

Obs.: . Nível de significância estatística: 0,0001

. Elementos fora-da-diagonal são observações mal-classificadas.

* Grupos 1 a 6 = Poço Testa Branca

7 a 12 = Poço Mangabeiras

13 e 14 = Poço Barão de Grajaú

15 a 18 = Poço Floriano

TABELA 5.14
MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO OBTIDA A PARTIR DE UMA ANÁLISE DISCRIMINANTE
SOBRE 9 VARIÁVEIS SIMULANDO DADOS TM (LANDSAT-5) (400 A 1000 nm)

GRUPOS*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	PRECISÃO DE CLASSIFICAÇÃO (%)
1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7
2	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7
3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
4	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7
5	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	75
6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
7	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
9	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	25
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	50
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	100

(continua)

Tabela 5.14 - Conclusão.

GRUPOS*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	PRECISÃO DE CLASSIFICAÇÃO (%)
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	100
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	100
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	100
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	100
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	100
17	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	66,7
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	66,7
PRECISÃO MÉDIA (%)																			
																			79,6

Obs.: . Nível de significância estatística: 0,0001

. Elementos fora-da-diagonal são observações mal-classificadas.

*Grupos 1 a 6 - Poço Testa Branca
 7 a 12 - Poço Mangabeiras
 13 e 14 - Poço Barão de Grajaú
 15 a 18 - Poço Floriano

TABELA 5.15

ESTATÍSTICA MULTIVARIADA E APROXIMAÇÕES F

ESTATÍSTICA	VALOR	F. APROXIMADO	G.L. NUMERADOR	G.L. DENOMINADOR	Pr > F
Wilks' Lambda	$1,28 \times 10^{-6}$	3,827	204	263	0,0001
Traço de Pillai	6,547	2,472	204	420	0,0001
Traço Hotelling-Lawley	47,485	5,160	204	266	0,0001
Raiz maior de Roy	18,376	37,832	17	35	0,0001

A hipótese H0 (vetor-média dos grupos são iguais) foi rejeitada ao nível de 0,0001 para todos os testes.

Uma medida de separabilidade entre grupos normalmente utilizada na aplicação de funções discriminantes lineares é a Distância Generalizada de Mahalanobis (D^2) (Rao, 1973). A Tabela 5.16 ilustra os valores de D^2 para discriminação entre pares de grupos, a partir da função gerada com intervalos espectrais estreitos. Quanto menor o valor de D^2 , maior o grau de similaridade destes grupos.

O desempenho destes dados para o correlacionamento dos diversos grupos litológicos entre dois poços pôde ser melhor avaliado, normalizando-se os valores de D^2 em função do maior índice presente. O complemento dos resultados, variando entre 0 e 1, foi utilizado, para que os valores próximos de 1 representassem o maior grau de similaridade.

A Fig. 5.12 ilustra a separabilidade espectral entre as litologias dos poços Barão de Grajaú e Testa Branca. Analisando os picos das curvas (valores próximos a 1), pode-se concluir que o grupo 13 é similar ao grupo 4 do poço Testa Branca, ambos sendo constituídos por folhelhos. Da mesma maneira, o grupo 14 teria o grupo 5 como equivalente no poço Testa Branca, ambos sendo constituídos por arenitos acinzentados de textura fina.

Esta linha de raciocínio foi utilizada para um maior número de grupos, como ocorre entre os poços Testa Branca e Mangabeiras. Tomando como referência o poço Testa Branca e analisando os picos das curvas em cada janela da Fig. 5.13, as seguintes correspondências espectrais foram obtidas: G1 com G10, G2 com G8, G3 com G9, G4 com G9, G5 com G10, G6 com G7.

Do ponto de vista estratigráfico, houve necessidade de analisar estas relações em função da profundidade de coleta das amostras nos poços e do tipo litológico presente em cada grupo, como observado na Fig. 5.14. As correspondências descritas acima estão indicadas pelas setas, cujas intersecções representam informações discordantes do ponto de vista estratigráfico, mas compreensíveis do ponto de vista espectral.

TABELA 5.16

SUMÁRIO DAS MEDIDAS DE SEPARABILIDADE ENTRE PARES DE GRUPOS
UTILIZANDO A DISTÂNCIA GENERALIZADA DE MAHALANOBIS

GRUPO*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	31,5	62,6	33,4	50,8	42,5	36,7	46,5	28,3	32,1	52,1	27,7	71,7	128,2	74,8	131,5	34,7	38,8
2		0	59,9	46,4	56,3	50,6	45,4	30,1	36,0	35,5	76,9	49,6	89,0	127,5	40,9	129,7	58,0	47,8
3			0	27,2	90,3	82,5	86,6	61,7	47,1	48,5	53,0	64,4	108,2	167,2	113,6	158,5	82,3	73,3
4				0	89,5	70,9	65,1	80,7	24,1	34,1	33,7	23,6	45,9	184,0	112,9	199,3	48,2	65,3
5					0	21,1	29,5	38,7	35,9	27,1	53,9	56,7	113,9	58,9	92,9	71,3	45,4	5,8
6						0	5,6	44,6	35,0	14,0	43,5	35,2	98,7	120,0	73,5	80,3	45,5	23,5
7							0	41,4	33,8	17,0	44,7	27,5	94,3	136,1	56,2	93,5	42,9	30,8
8								0	54,4	45,4	88,4	78,3	148,8	120,8	23,6	57,6	77,9	39,8
9									0	25,6	49,2	12,6	46,7	104,6	101,4	157,4	6,5	17,8
10										0	14,9	23,8	71,9	117,7	75,2	94,7	47,7	25,6
11											0	36,3	80,7	171,4	124,8	136,0	80,2	62,7
12												0	36,5	157,0	106,1	173,1	20,0	38,1
13													0	209,1	184,1	273,9	52,6	84,3
14														0	205,5	164,2	127,5	95,6
15															0	86,9	127,5	95,6
16																0	191,9	95,0
17																	0	23,4
18																		0

Obs.: Nível de significância estatística: 0,0001.

* Grupos 1 a 6 = Poço Testa Branca
 7 a 12 = Poço Mangabeiras
 13 e 14 = Poço Barão de Grajaú
 15 a 18 = Poço Floriano

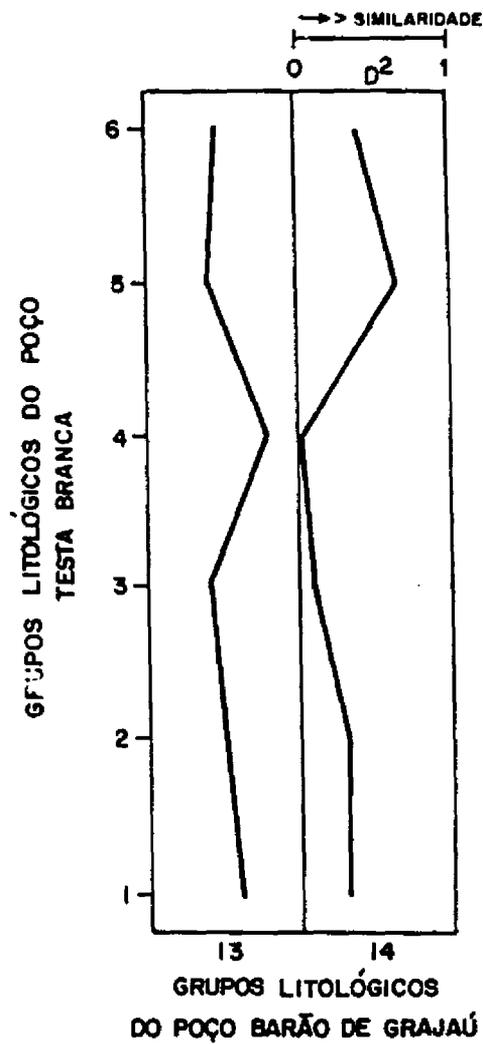


Fig. 5.12 - Separabilidade espectral entre grupos litológicos dos Poços Barão de Grajaú e Testa Branca, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis normalizada (D^2).

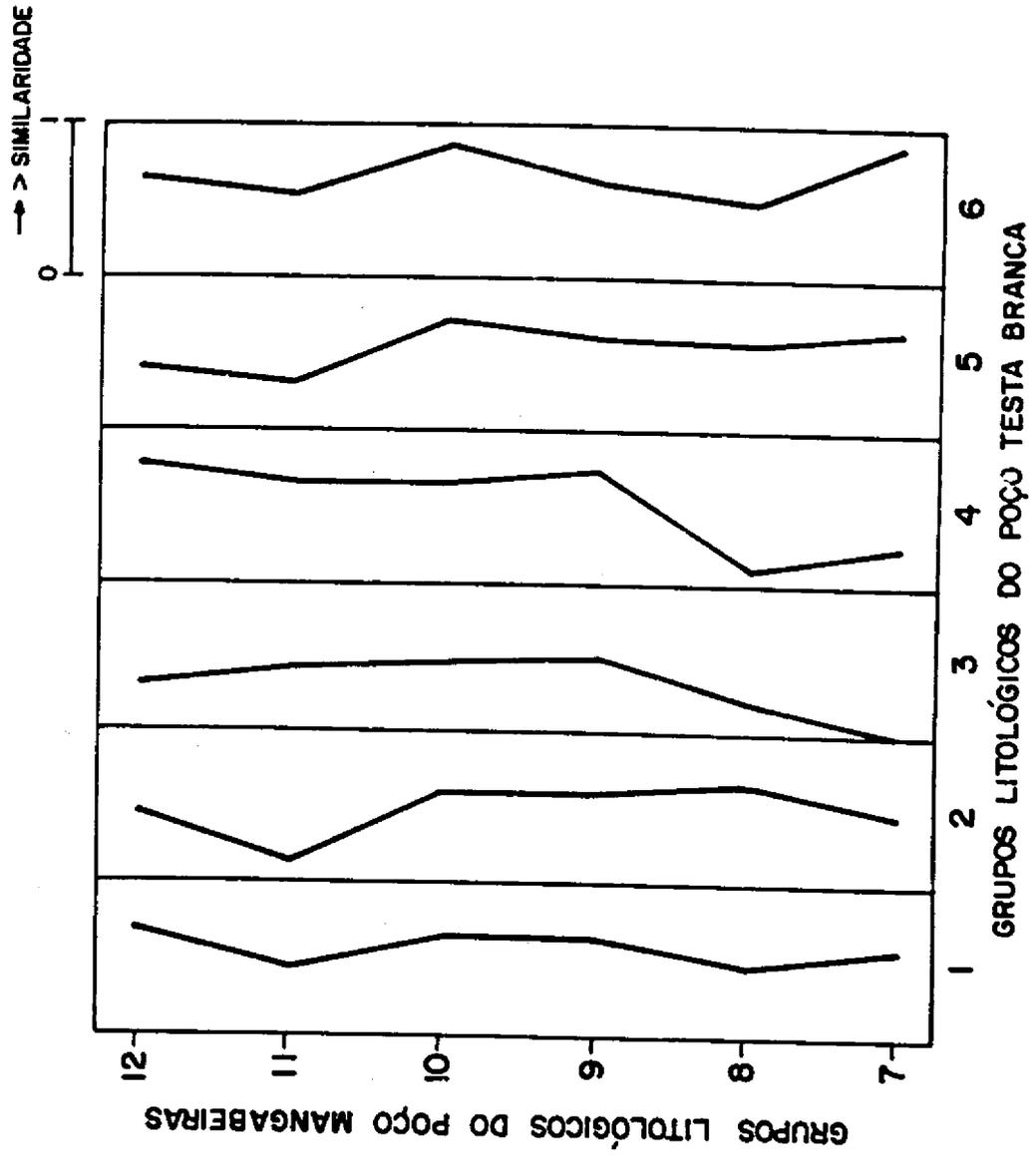


Fig. 5.13 - Separabilidade espectral entre grupos litológicos dos Poços Testa Branca e Mangabeiras, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis (D2).

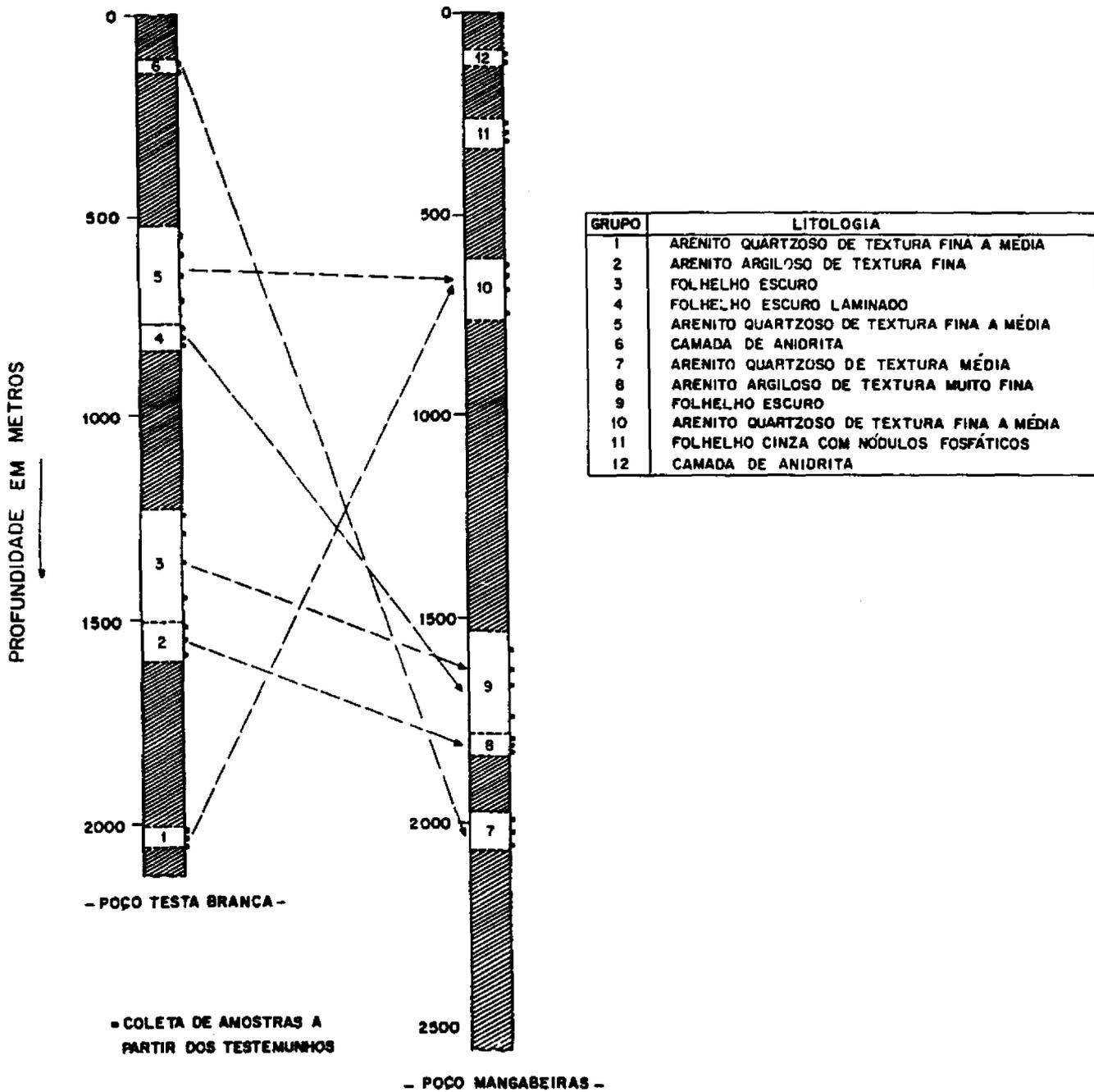


Fig. 5.14 - Correlacionamento estratigráfico espectral entre grupos litológicos pertencentes aos poços Testa Branca e Mangabeiras, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis normalizada (D^2).

Qual seria então o melhor correlacionamento estratigráfico destes grupos de rochas entre os dois poços?

Em relação a esta questão, usando os critérios profundidade e litologia, observando a Fig. 5.14 e admitindo que para cada grupo de rocha há no máximo um outro correspondente, teria-se os seguintes pontos estratigráficos divergentes em ordem decrescente de importância:

- grupos 6 e 7 (litologias e profundidade totalmente discrepante: anidrita/arenito e topo/base, respectivamente);
- grupos 01 e 10 (base do poço Testa Branca com a porção superior do Poço Mangabeiras).

A relação-chave nesta análise é a concordância entre os grupos 2-8, 3-9 e 5-10. Observando estas correspondências, torna-se fácil relacionar pelo critério litologia os grupos 6 e 12 e pelo critério profundidade os grupos 1 e 7. A interpretação final desta discussão é vista na Fig. 5.15. As linhas cheias representam relações, do ponto de vista litoestratigráfico espectral, inteiramente concordantes. Na parte direita desta figura, ilustram-se as unidades estratigráficas da Bacia do Parnaíba correspondente aos grupos de litologias analisadas neste trabalho.

É provável que melhores resultados fossem obtidos com a utilização de dados de reflectância na faixa de 400 a 2500 nm. Além das feições espectrais oriundas da presença de ferro nas amostras, esta faixa espectral poderia propiciar a detecção de feições de OH^- , CO_3^{-2} e SO_4^{-2} , diagnósticas da presença de alguns minerais e rochas. Conseqüentemente, os valores da Distância Generalizada de Mahalanobis poderiam ser bem mais efetivos para a discriminação dos grupos litológicos, durante o processo de correlacionamento litoestratigráfico espectral dos poços de perfuração.

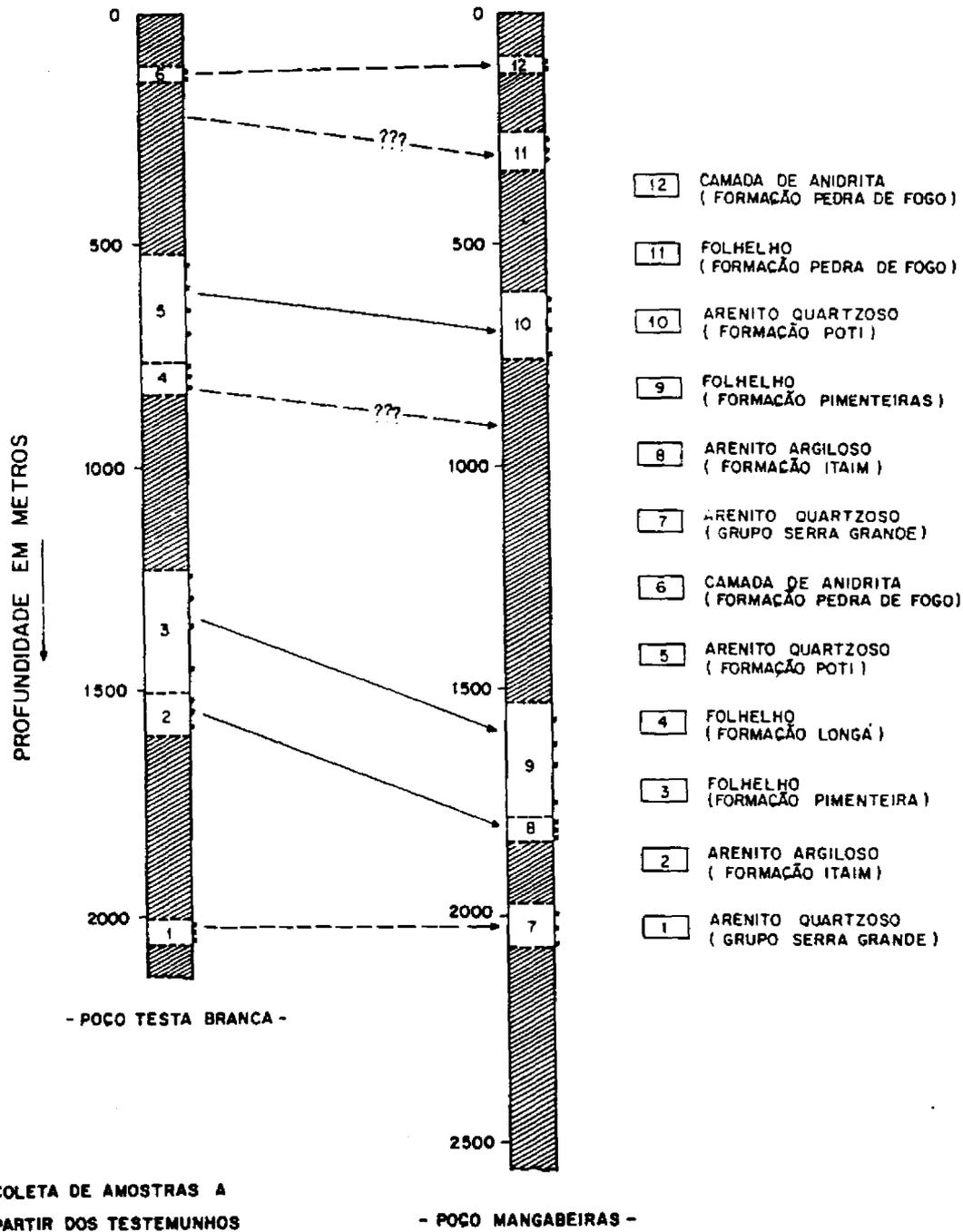


Fig. 5.15 - Correlacionamento estratigráfico espectral entre grupos litológicos pertencentes aos poços Testa Branca e Mangabeiras, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis normalizada (D^2).

5.3.5 - O AJUSTE GEOMÉTRICO ENTRE AS COLUNAS DE DADOS ESPECTRAIS

Com o objetivo de confirmar os resultados da Fig. 5.15, buscando a posição de melhor correlação espectral entre as seções Testa Branca e Mangabeiras, aplicou-se a técnica Correlação-cruzada. Resumidamente, esta técnica consiste em obter todas as possíveis comparações entre as duas seqüências, movendo uma coluna de dados contra a outra (Apêndice D).

Para a aplicação de tal técnica neste trabalho, a matriz de correlação envolvendo as 12 variáveis utilizadas na obtenção da função discriminante foi analisada. As variáveis menos correlacionadas foram então escolhidas para serem individualmente submetidas à análise estatística.

O correlograma da Fig. 5.16 ilustra as possíveis posições de correlacionamento espectral entre os poços Testa Branca e Mangabeiras com base na variável 35 ($R_{9/5}$). Os picos da curva com correlação superior a 0,5 foram analisados em função do ajuste geométrico dos grupos e do número de observações emparelhadas. Dentre as posições de emparelhamento envolvendo um maior número de grupos, a posição 20 é a mais significativa, com o ajuste geométrico dos grupos entre os poços mostrado na parte superior direita do gráfico. De um ponto de vista estratigráfico, este ajuste não é tão elucidador, pois os grupos litológicos do poço Testa Branca situam-se em posições intermediárias em relação aos grupos do poço Mangabeiras. Dois aspectos devem ser destacados no contexto destes resultados. O primeiro é o fato de não ter sido feita uma amostragem contínua ao longo de cada poço. Desta forma, o atributo profundidade indiretamente foi subestimado. A segunda preocupação é o fato evidenciado na Fig. 5.15 de alguns grupos litológicos (G4 e G11) não terem correspondentes, o que pode ter mascarado os valores numéricos da correlação durante o emparelhamento das observações. Isto de fato pode ocorrer na natureza, onde variações laterais de fácies litológicas tornam possível a presença de uma determinada unidade estratigráfica num poço e a sua ausência em outro próximo. São razões como estas que justificam uma interpretação cuidadosa dos resultados obtidos com a Correlação-cruzada em qualquer situação.

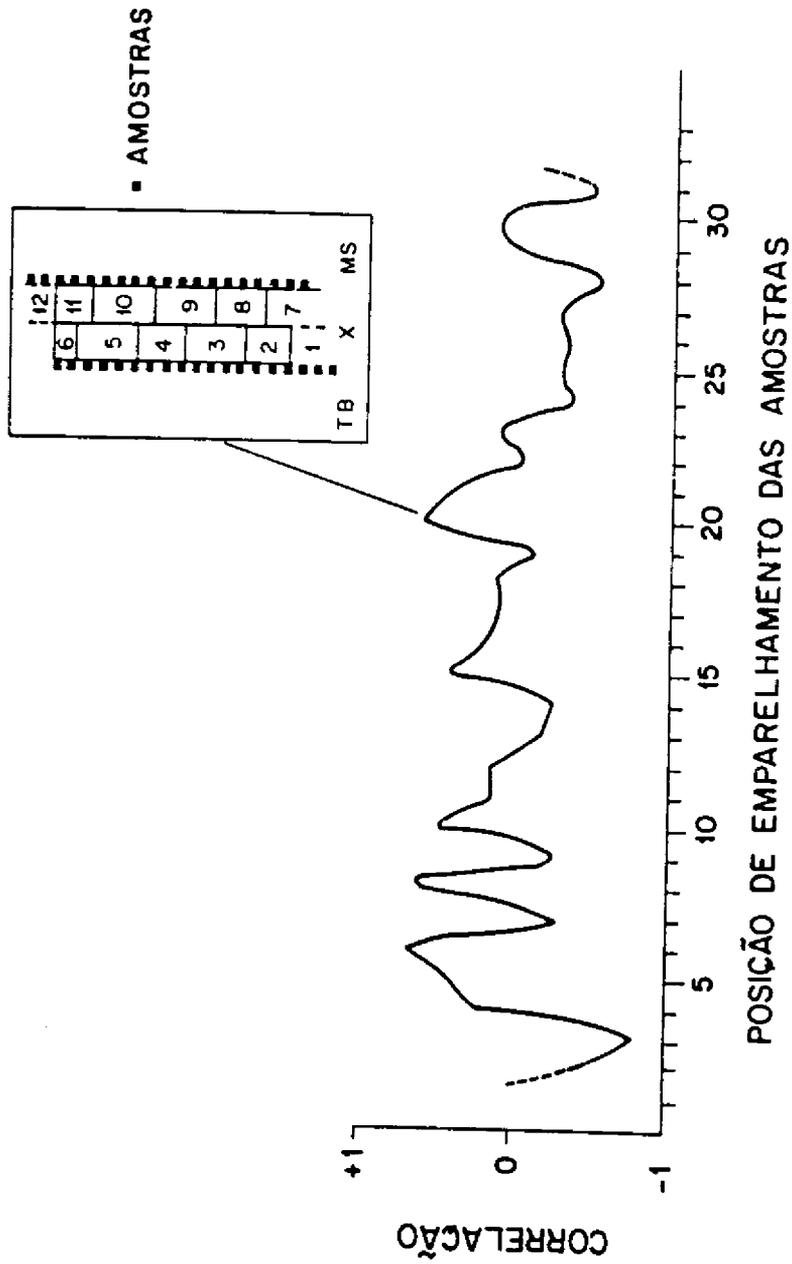


Fig. 5.16 - Correlação-cruzada entre os Poços Testa Branca (TB) e Mangabeiras (MS), obtida a partir da variável 35 (razão 9/5).

Evidentemente, associadas aos critérios litologia e profundidade de coleta das amostras, outras fontes de informação, tais como dados de resistividade elétrica e radiação gama, seriam valiosas no processo de correlacionamento estratigráfico de poços baseado em dados de reflectância espectral dos litotipos.

5.4 - AVALIAÇÃO QUALITATIVA

Uma variável útil na discriminação espectral de rochas é aquela que mostra valores significativamente diferentes entre grupos e que variam pouco dentro de cada um deles. O que constitui uma diferença significativa, do ponto de vista estatístico, foi alvo da discussão anterior envolvendo a avaliação quantitativa dos dados. Entretanto, é possível julgar qualitativamente se uma determinada variável é importante ou não no processo discriminante, plotando-se seus valores médios em função dos grupos e observando a sua variabilidade (Whitney et al. 1983).

A Tabela 5.17 relaciona a ordenação das 12 melhores variáveis para a discriminação dos grupos litológicos dos poços Testa Branca, Mangabeiras, Barão de Grajaú e Floriano, de acordo com a avaliação quantitativa dos dados. As primeiras variáveis selecionadas são sempre razões entre bandas do infravermelho próximo e visível, sensíveis em grande parte, portanto, às variações no conteúdo de ferro das amostras. A Fig. 5.17 ilustra a plotagem dos valores médios de algumas variáveis em função dos grupos litológicos. Foram plotadas 4 variáveis: v35 (a melhor dentre as 12 de acordo com a avaliação quantitativa), v14 (2º lugar), v47 (6º lugar) e v19 (último lugar).

Analisando esta figura, pode-se verificar que as melhores variáveis selecionadas pelo processo quantitativo são realmente as que apresentam maior variabilidade entre os grupos. Este é o caso, por exemplo, das variáveis v35 e v14 quando comparadas com a v19. Parece haver, no entanto, uma inversão na ordem das duas primeiras melhores variáveis. A variabilidade da variável v14 aparentemente é maior que a v35 e ela é nitidamente mais útil para discriminar grupos como os 14, 15 e 16 ou pares de grupos como os 1 e 2.

TABELA 5.17

ORDENAÇÃO DAS 12 MELHORES VARIÁVEIS ESPECTRAIS, BASEADA NA ANÁLISE
DISCRIMINANTE LINEAR, PARA A DISCRIMINAÇÃO
LITOLÓGICA ENTRE OS POÇOS DE PERFURAÇÃO

ORDEM	VARIÁVEIS	
	NÚMERO	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)
1	V35 (R9/5)	795-805/545-555
2	V14 (R11/3)	980-990/445-455
3	V36 (R9/6)	795-805/595-605
4	V43 (R8/5)	745-755/545-555
5	V49 (R7/4)	645-655/495-505
6	V47 (R7/2)	645-655/425-435
7	V26 (R10/5)	895-905/545-555
8	V16 (R11/5)	980-990/545-555
9	V56 (R6/5)	595-605/545-555
10	V4 (BANDA 4)	495-505
11	V63 (R4/3)	495-505/445-455
12	V19 (R11/8)	980-990/745-755

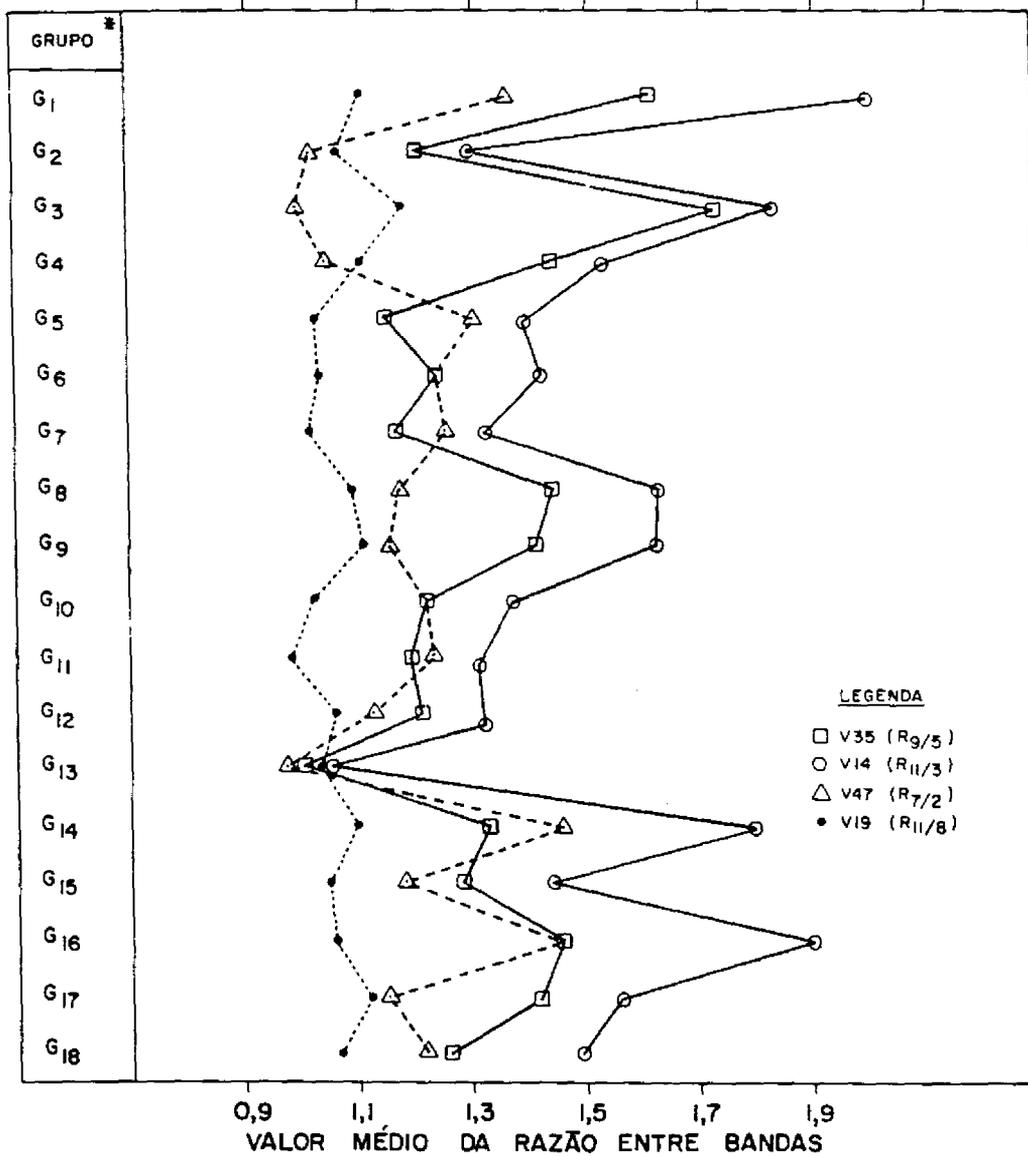


Fig. 5.17 - Variabilidade de algumas variáveis espectrais selecionadas pela avaliação quantitativa dos dados.

* GRUPO 1 a 6 - Poço Testa Branca
 7 a 12 - Poço Mangabeiras
 13 e 14 - Poço Barão de Grajaú
 15 a 18 - Poço Floriano

É óbvia, neste tipo de análise, a dificuldade de acompanhar de forma mais detalhada a separabilidade espectral das classes litológicas, quando estão envolvidos um maior número de grupos ou de variáveis, a exemplo do presente caso. Isto justifica a necessidade preliminar de uma abordagem quantitativa sobre os dados.

CAPÍTULO 6

A INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA RESPOSTA ESPECTRAL DAS ROCHAS DA BACIA DO PARNAÍBA

Esta investigação envolveu a utilização de 27 amostras de arenitos (16) e folhelhos (11), coletadas a partir dos testemunhos de perfuração. Os dados de reflectância foram obtidos com o Optronic 740A, operando em intervalos espectrais de 5 nm na faixa de 400 a 1000 nm. Análises químicas foram efetuadas a partir dos fragmentos de rochas obtidos sobre a face de medição para cada uma das amostras. Determinações do conteúdo do carbono orgânico total (COT) também foram feitas.

A avaliação da influência espectral da composição química, no contexto litológico da Bacia do Parnaíba, envolveu a obtenção das correlações entre cada variável dependente (valores médios de reflectância para cada uma das 11 bandas simples relacionadas na Tabela 5.1) e as seguintes variáveis independentes:

- V1 = tamanho das partículas minerais;
- V2 = %SiO₂;
- V3 = %Al₂O₃;
- V4 = %CaO;
- V5 = %MgO;
- V6 = %Fe₂O₃;
- V7 = %K₂O;
- V8 = %Na₂O;
- V9 = %MnO₃;
- V10 = %TiO₂;
- V11 = %P₂O₅;
- V12 = %Carbono orgânico total.

Optou-se pela inclusão da variável independente "tamanho predominante das partículas minerais", cujos efeitos espectrais têm sido discutidos por vários trabalhos, conforme visto no Capítulo 3. Observações microscópicas sobre seções delgadas propiciaram uma estimativa da granulometria predominante nos arenitos. Para o caso dos folhelhos, um tamanho único de 0,002 mm foi adotado. Em ambos os casos, a tabela de granulometria de Inman (1952) foi usada nas estimativas.

6.1 - OS RESULTADOS OBTIDOS

A Fig. 6.1 ilustra as correlações obtidas a partir de 27 amostras de arenitos e folhelhos. A alta correlação existente entre as bandas explica o aspecto plano das curvas. Dentro do contexto destas amostras, a reflectância em todas as bandas é bem correlacionada com as variáveis V3 (%Al₂O₃), V6 (%Fe₂O₃), V12 (%Carbono orgânico total), V10 (%K₂O) e V1 (tamanho das partículas).

É conveniente, durante a análise dos resultados, examinar a matriz de correlação das variáveis independentes mostrada na Fig. 6.2. Observa-se, por exemplo, uma correlação relativamente alta e negativa entre a variável V1 (tamanho das partículas) e V3 (%Al₂O₃). Segundo este dado, quanto maior o conteúdo de Al₂O₃, menor o tamanho dos grãos. Ele exprime a diminuição do tamanho das partículas com a mudança composicional de arenito para folhelho, o que é um fato óbvio. Desta forma, a correlação alta e positiva obtida entre V1 e a reflectância nas diversas bandas (Fig. 6.1), que implicaria num aumento da resposta espectral com uma maior granulometria da rocha, representa de forma indireta um aumento da resposta espectral com a modificação química introduzida na passagem de folhelho para arenito (maior para menor %Al₂O₃). Isto demonstra o cuidado que se deve ter na análise dos resultados e na elaboração do modelo, visto que muitas das variáveis independentes possuem correlação alta entre si. É interessante, assim, analisar a influência de V3, V6, V12, V10 e V1 em cada classe de rocha (arenito ou folhelho).

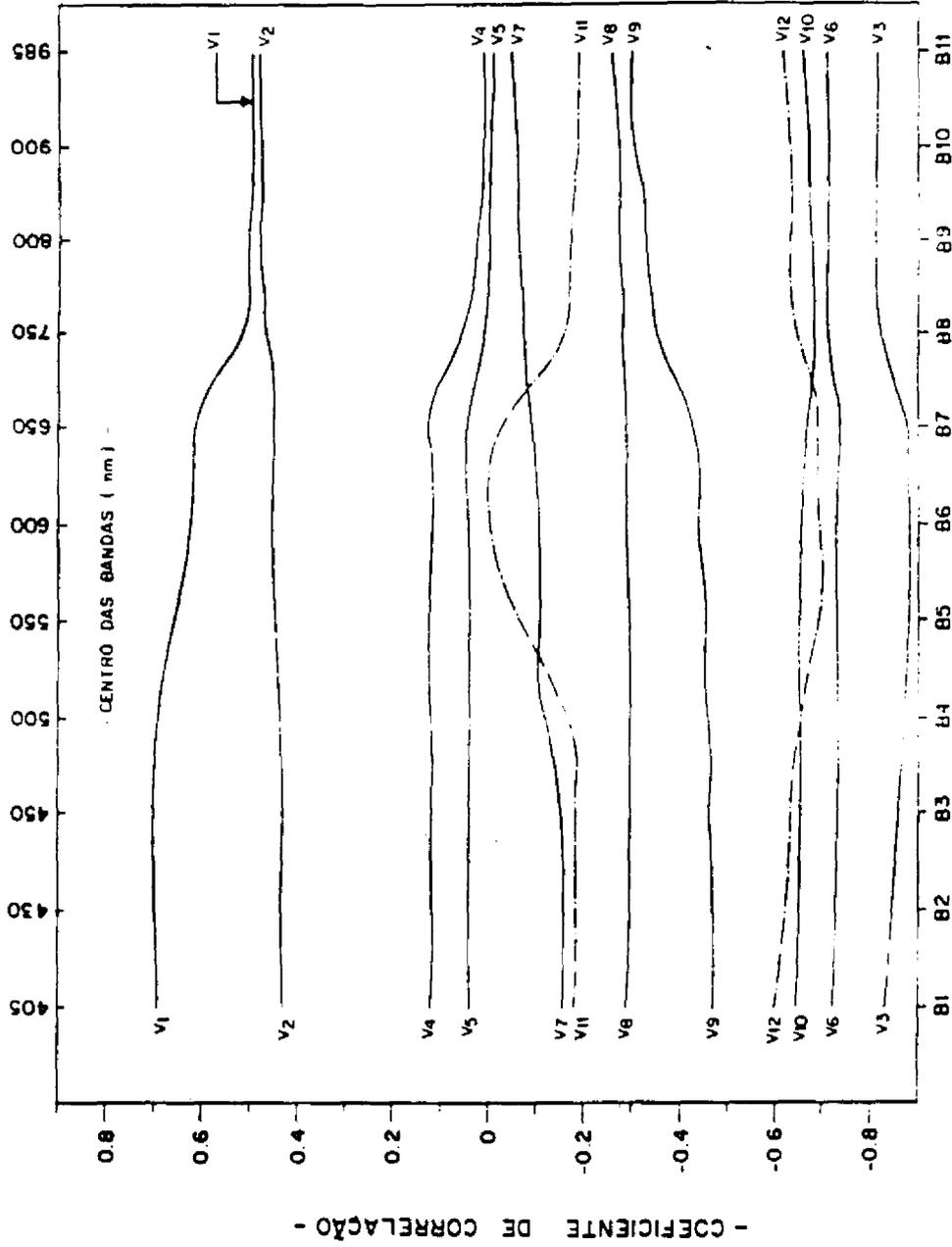


Fig. 6.1 - Correlação da composição química e granulometria de 27 amostras de arentos e folhelhos com valores medios de reflectância de bandas estreitas (10 nm de largura).

As variáveis independentes são: V_1 = tamanho das partículas; V_2 = % SiO_2 ; V_3 = % Al_2O_3 ; V_4 = % CaO ; V_5 = % MgO ; V_6 = % Fe_2O_3 ; V_7 = % MnO_3 ; V_8 = % P_2O_5 ; V_9 = % TiO_2 ; V_{10} = % K_2O ; V_{11} = % Na_2O ; V_{12} = % carbono orgânico total.

Obs.: As correlações envolvendo as variáveis V_4 , V_5 , V_7 , V_8 e V_{12} não são significantes ao nível de 0,05.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
V1	1,00											
V2	0,59	1,00										
V3	-0,65	-0,57	1,00									
V4	-0,16	-0,65	-0,12	1,00								
V5	-0,30	-0,78	-0,03	0,85	1,00							
V6	-0,51	-0,58	0,85	-0,04	0,02	1,00						
V7	-0,05	-0,10	-0,07	0,14	0,15	-0,07	1,00					
V8	-0,36	-0,17	0,20	0,04	0,06	0,12	0,50	1,00				
V9	-0,24	-0,16	0,24	0,02	0,02	0,22	0,87	0,48	1,00			
V10	-0,46	-0,41	0,74	0,18	-0,07	0,56	0,07	0,27	0,23	1,00		
V11	-0,34	-0,01	0,07	-0,09	0,01	-0,12	0,12	-0,07	0,15	-0,03	1,00	
V12	-0,53	-0,47	0,69	0,14	0,16	0,38	-0,11	0,08	0,14	0,47	0,08	1,00

Fig. 6.2 - Matriz de correlação para as variáveis independentes, obtida a partir de 27 amostras de arenitos e folhelhos.

V1 = Tamanho das partículas

V2 = % SiO₂

V3 = % Al₂O₃

V4 = % CaO

V5 = % MgO

V6 = % Fe₂O₃

V7 = % MnO₃

V8 = % P₂O₅

V9 = % TiO₂

V10 = % K₂O

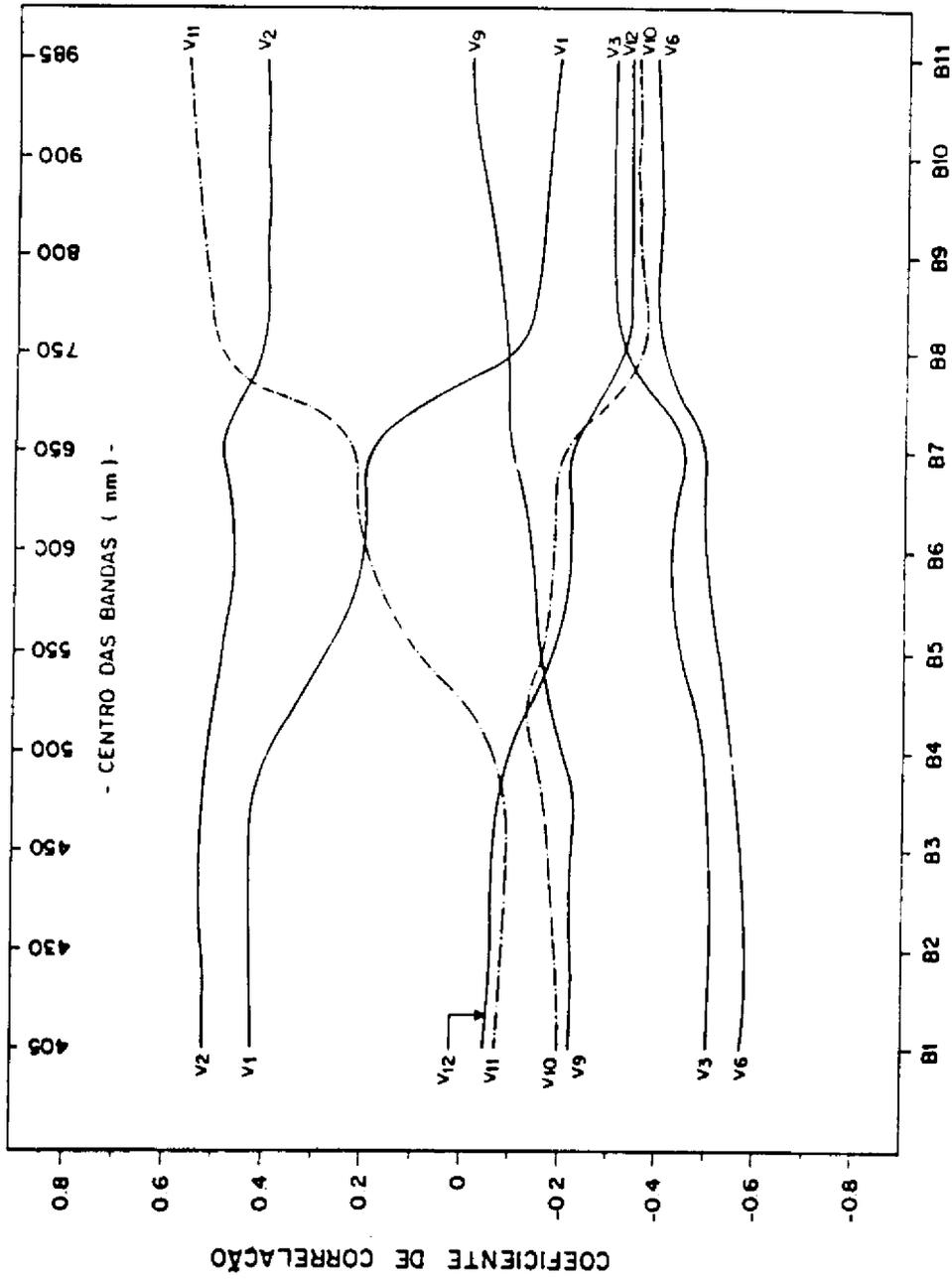
V11 = % Na₂O

V12 = % Carbono orgânico total

As correlações entre a reflectância e as variáveis independentes, obtidas a partir de 16 amostras de arenitos são mostradas na Fig. 6.3. As variáveis V4, V5, V7 e V8, com valores de correlação insignificantes ou altamente correlacionadas com as demais variáveis independentes, foram omitidas para uma melhor representação visual do gráfico. A reflectância para todas as bandas é bem correlacionada com o conteúdo de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 das amostras, sendo a influência destes três componentes um pouco menor no infravermelho, onde há uma tendência do surgimento de Na_2O , K_2O e carbono orgânico como variáveis importantes, esta última com variação de teor das amostras da ordem de 0,01%. Dentre estas variáveis, SiO_2 e Al_2O_3 são altamente correlacionadas entre si e possuem também alta correlação com Na_2O , de acordo com a análise da matriz de correlação das variáveis independentes gerada para os arenitos. As correlações da reflectância com o tamanho das partículas não são significantes, apesar do aspecto curioso da curva. Na verdade, a granulometria das amostras utilizadas na análise é muito homogênea (areia fina e média predominantemente), o que pode explicar a sua baixa correlação com a reflectância.

As correlações obtidas a partir de 11 amostras de folhelhos são mostradas na Fig. 6.4. As variáveis V1, V4, V5, V7 e V9, a exemplo do que ocorreu na figura anterior, foram omitidas para uma melhor representação visual do gráfico. Neste contexto, duas variáveis aparecem com destaque: o teor de Al_2O_3 e o conteúdo de Fe_2O_3 . As demais variáveis vistas nestas figuras não apresentam correlações significativas.

Portanto, apenas as variáveis V3 ($\%\text{Al}_2\text{O}_3$) e V6 ($\%\text{Fe}_2\text{O}_3$) aparecem com destaque em ambas as classes de rochas. Correlações entre estas duas variáveis e as razões de reflectância das 11 bandas espectrais, ignorando-se as permutações, são mostradas nas Figs. 6.5 e 6.6. Os coeficientes de correlação, obtidos a partir das 27 amostras de arenitos e folhelhos, indicam ser as razões entre as bandas do visível (razões das bandas 7/1, 7/2, 6/1, 6/2, 5/1, 4/1, 4/2, 4/1, 3/2, 2/1) mais diagnósticas da presença da Al_2O_3 nas amostras.



BANDAS ESPECTRAIS

Fig. 6.3 - Correlação da composição química e granulometria de 16 amostras de arenitos com valores médios de reflectância de bandas estreitas (10 nm de largura) .

- As variáveis independentes são: V_1 = tamanho das partículas; V_2 = % SiO_2 ; V_3 = % Al_2O_3 ; V_6 = % Fe_2O_3 ; V_9 = % TiO_2 ; V_{10} = % K_2O ; V_{11} = % Na_2O ; V_{12} = % carbono orgânico total.

Apenas as correlações envolvendo as variáveis V_6 , V_2 , V_{10} e V_{12} (B_8 a B_{11}) são significantes ao nível de 0,05.

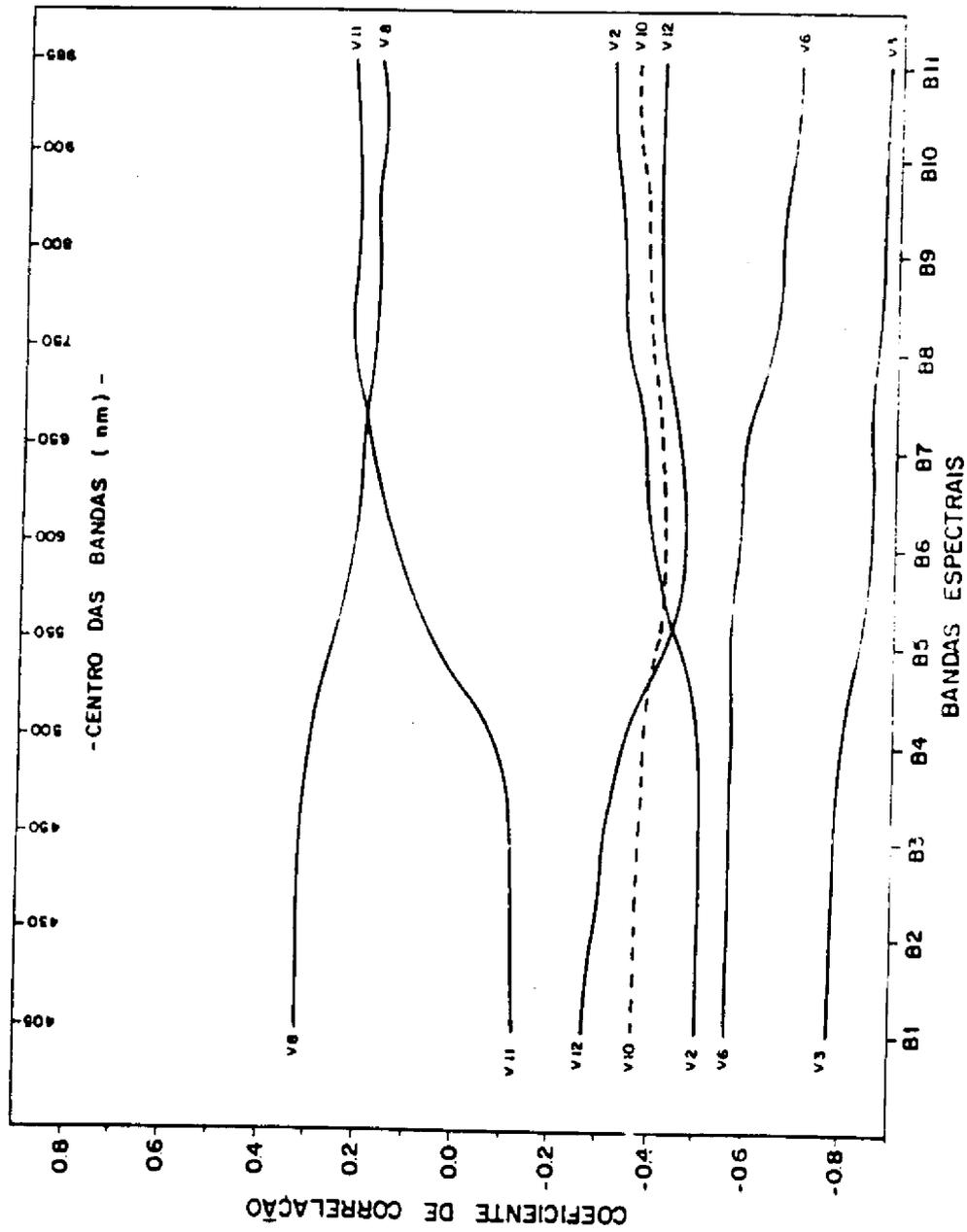


Fig. 6.4 - Correlação da composição química de 11 amostras de folhelhos com valores médios de reflectância de bandas estreitas (10 nm de largura).

- As variáveis independentes são: V_2 = % SiO_2 ; V_3 = % Al_2O_3 ; V_6 = % Fe_2O_3 ; V_8 = % P_2O_5 ; V_{10} = % K_2O ; V_{11} = % Na_2O ; V_{12} = % carbono orgânico total.

Apenas as correlações envolvendo as variáveis V_6 e V_3 são significantes ao nível de 0,05.

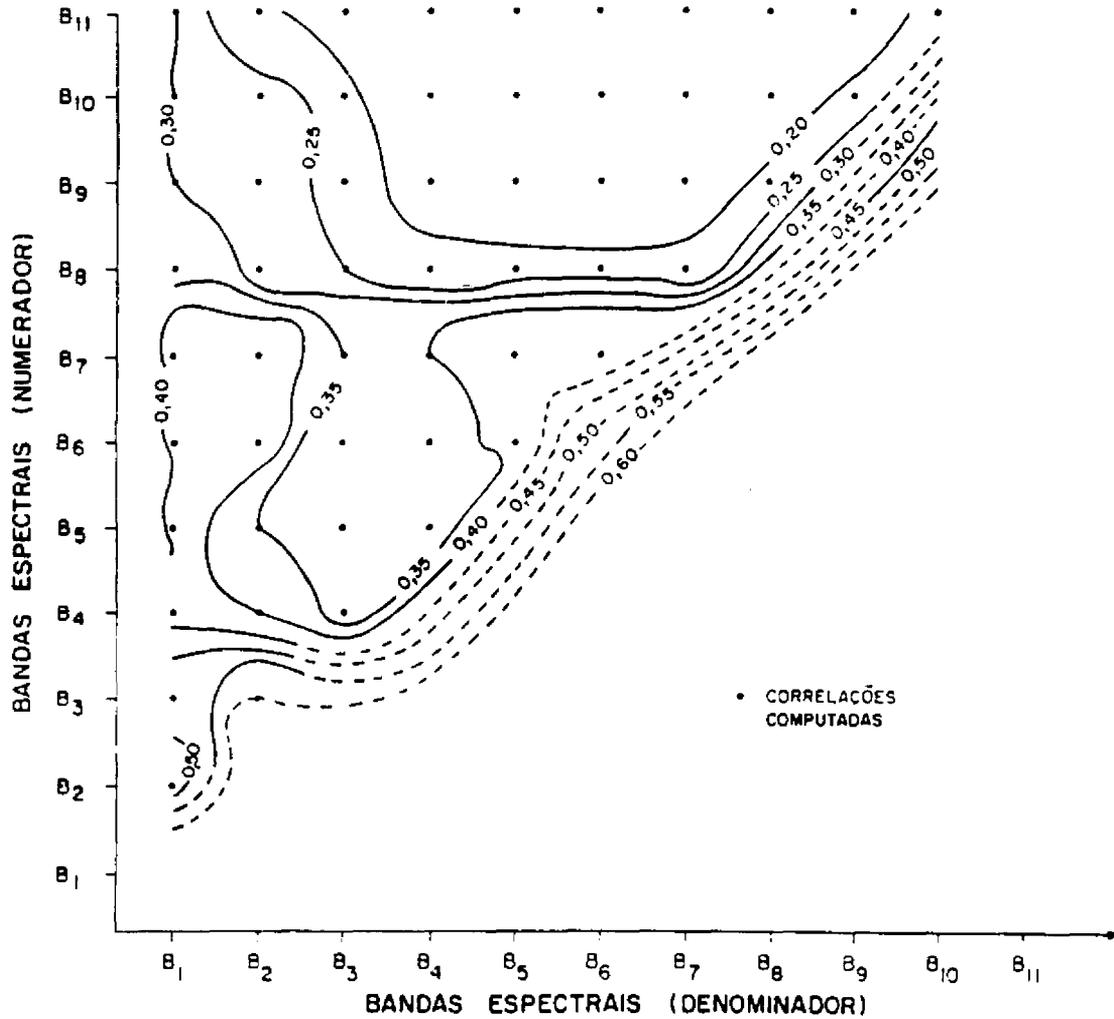


Fig. 6.5 - Mapa de contorno do coeficiente de correlação entre a variável V3 (Al_2O_3) e razões de reflectância (400 a 1000 nm).
- Todas as correlações são negativas.

Por outro lado, a presença de Fe_2O_3 nas amostras é melhor correlacionada com as razões de bandas do infravermelho (razões das bandas 11/9, 11/10, 10/9) e também do visível (razões das bandas 7/5, 7/6, 3/2).

São surpreendentes as relativamente baixas correlações obtidas entre a reflectância e a % de carbono orgânico nos folhelhos (Fig. 6.4), o que conduz a observação que sua presença de destaque na Fig. 6.1 deve-se em grande parte a sua boa correlação com Al_2O_3 (Fig. 6.2).

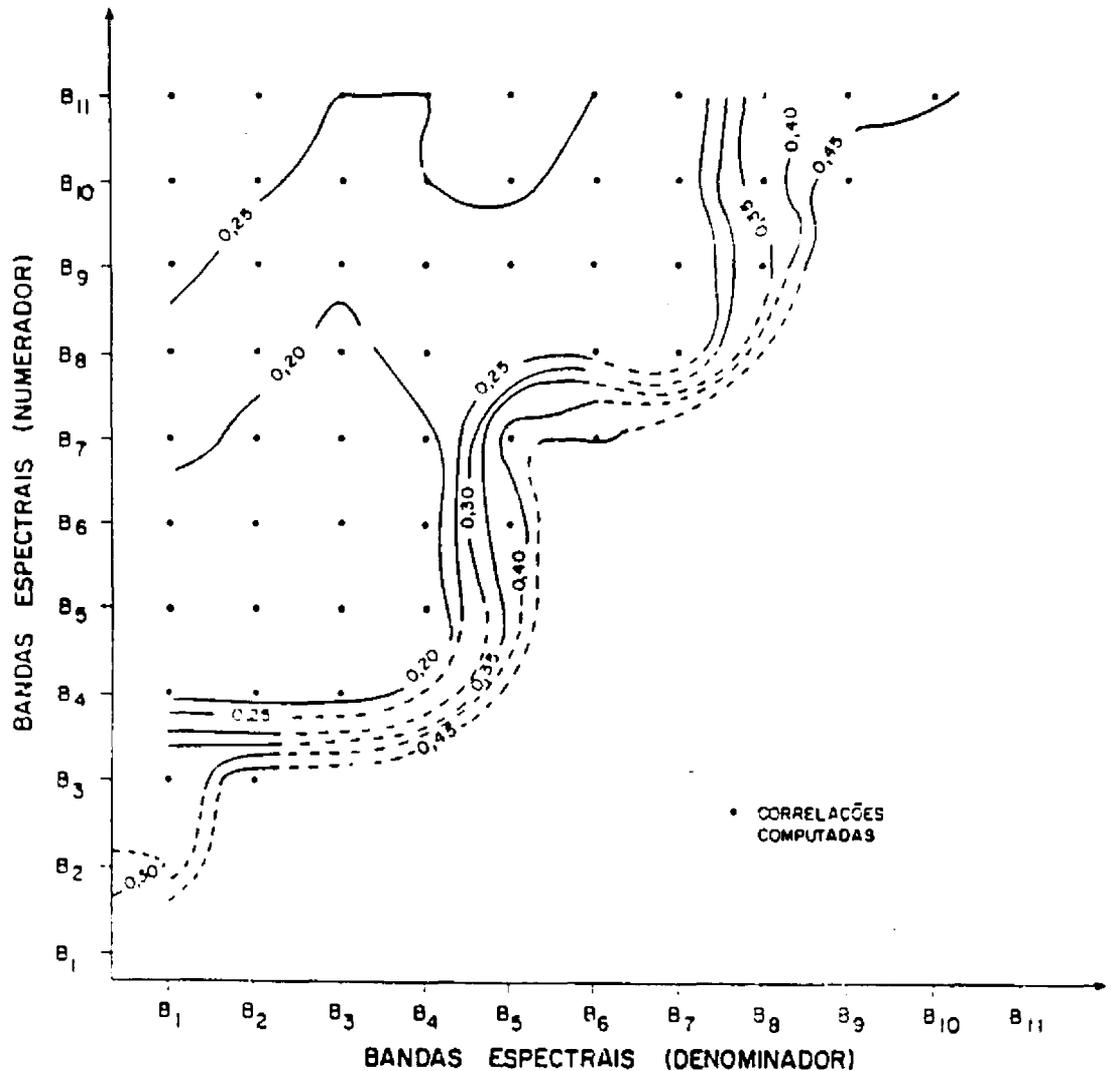


Fig. 6.6 - Mapa de contorno do coeficiente de correlação entre a variável V6 (Fe_2O_3) e razões de reflectância (400 a 100 nm).
- Todas as correlações são negativas.

A verdade é que após a observação dos trabalhos de Hunt e coautores, que evidenciaram ser a matéria orgânica presente em condritos carbonosos ou em rochas sedimentares responsável pelo mascaramento de feições espectrais no visível e infravermelho próximo, pouca atenção tem sido dada no estudo de seus efeitos espectrais. É preciso destacar o trabalho de Crowley (1986) que observou que o tipo e a quantidade de matéria orgânica têm pronunciados efeitos espectrais na reflectância de calcários. Quantidades inferiores a 0,01% reduziram a reflectância das amostras e a intensidade das bandas de absorção, fato este também observado no Bra-

sil por Meneses (1986) estudando rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (BA). Entretanto, um dos aspectos mais interessantes do trabalho de Crowley (1986) é o fato dele não ter encontrado correlações significativas entre a reflectância de suas amostras e razões H/C (Hidrogênio/Carbono) ou quantidades de querogênio, o que de certa forma é concordante com os resultados do presente trabalho. Um dos argumentos usados por Crowley (1986) para explicar este fato é a possibilidade de impurezas orgânicas solúveis (hidrocarbono e betúmen) contribuírem espectralmente de forma significativa, quando normalmente constituem uma pequena parte da fração orgânica total.

De um ponto de vista qualitativo, a inspeção das curvas espectrais das rochas da Bacia do Parnaíba revelou informações interessantes sobre a influência dos constituintes menores da rocha, principalmente Fe_2O_3 e matéria orgânica, sobre a reflectância das amostras. A Fig. 6.7 reúne curvas espectrais extraídas do Capítulo 5, mais propriamente das Figs. 5.7 a 5.10, compreendendo amostras representativas de alguns grupos litológicos presentes nos poços. Analisando os espectros de reflectância desta figura, pode-se observar a presença de algumas feições espectrais oriundas da presença de ferro nas amostras. As mais comuns compreendem uma rápida queda da intensidade da reflectância, a partir de 800 nm, em direção ao azul. Elas provavelmente são decorrentes de um processo de transferência de cargas entre Fe-O, conforme discutido por Hunt (1977), estando presentes de forma típica nas curvas 1, 5 e 6 da Fig. 6.7. Estas feições possuem um ponto característico de inflexão da curva, situado próximo a 700 nm, de acordo com a análise das curvas resultantes da aplicação da primeira derivada nos espectros de reflectância, a exemplo do mostrado na Fig. 5.5 do Capítulo anterior. A contribuição do ferro também é observada na curva da Fig. 6.7, através de uma banda ampla e muito suave entre 600 e 700 nm. Bandas de absorção mais estreitas, como as observadas na curva 3 entre 500 e 600 nm, são mais raras.

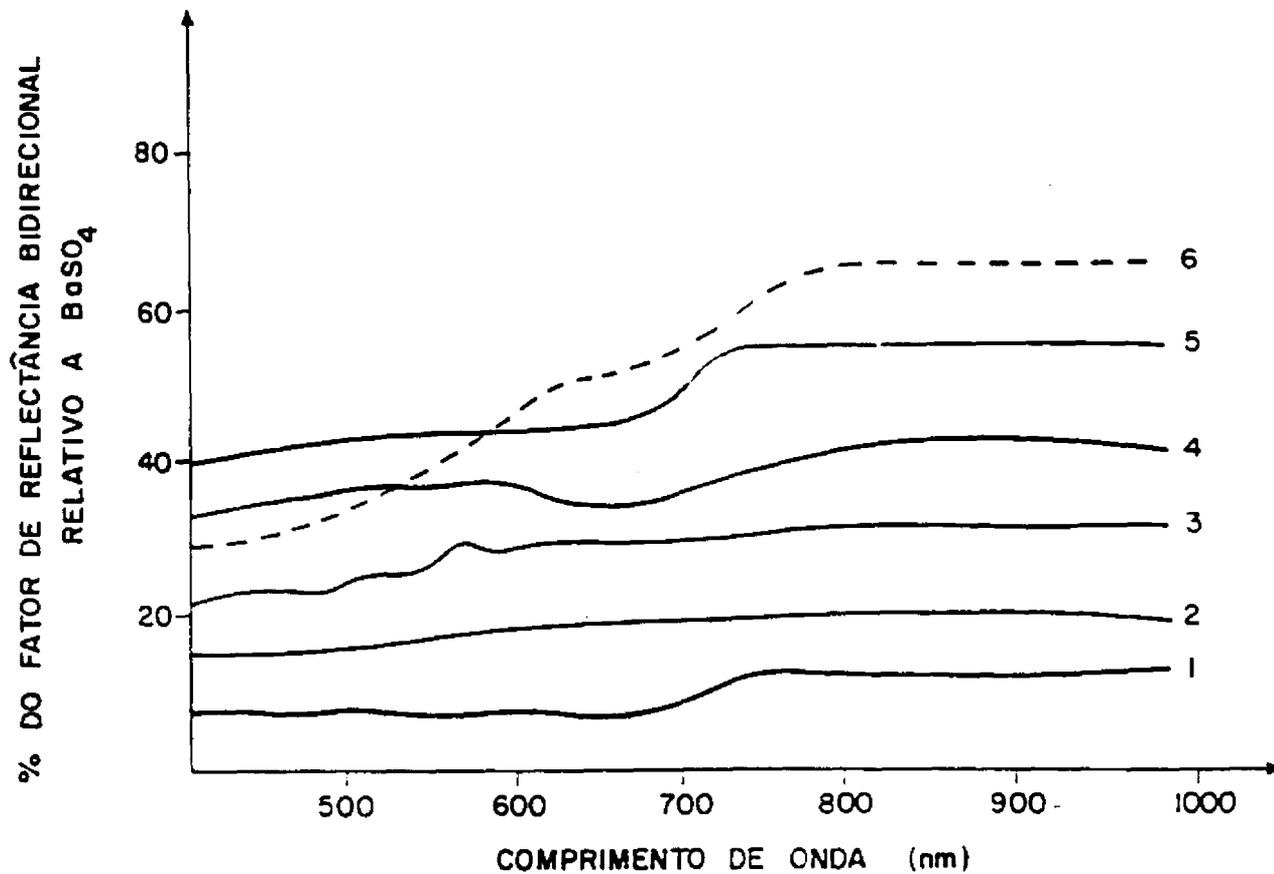


Fig. 6.7 - Curvas de reflectância espectral para amostras de rochas da bacia do Parnaíba.

- Curvas 1 = folhelho preto micáceo (Formação Pimenteira)
 2 = folhelho com pequenos nódulos fosfáticos (Formação Pedra de Fogo)
 3 = arenito quartzoso de textura fina a média (Formação Poti)
 4 = arenito argiloso de textura muito fina (Formação Itaim)
 5 = arenito argiloso de textura fina (Formação Ipu)
 6 = arenito quartzoso de textura muito fina (Formação Jaicós)

Há uma relação aparente, pelo menos para os arenitos, entre o conteúdo de ferro das amostras e o gradiente das curvas de reflectância na faixa espectral entre 600 e 800 nm. Quanto maior o conteúdo de ferro, maior a declividade relativa da curva, conforme observado na Fig. 6.7 pelas curvas 6 (2,09% de Fe_2O_3) e 4 (0,78% de Fe_2O_3). Uma correlação entre gradiente e conteúdo de ferro de 0,74, a partir de 9 amostras e significativa ao nível de 0,05, foi obtida para os arenitos, enquanto que para os folhelhos este valor foi de 0,57. Esta relação pode estar sendo obliterada nos folhelhos pela presença de material opaco carbonoso, que tende a mascarar as feições espectrais oriundas do ferro, conferindo um aspecto liso às curvas. O leitor pode comparar, por exemplo, as curvas 1 e 2 da Fig. 6.7. A primeira curva é de um folhelho bem mais rico em ferro do que o da segunda, mas é também bem mais rico em matéria orgânica (5,53 e 2,21% de Fe_2O_3 //1,10 e 0,29% de carbono orgânico total, respectivamente). Isto provavelmente explica a sua menor reflectância com relação à curva 2 e também a presença de uma feição espectral com gradiente menor do que o esperado, em função do alto conteúdo de ferro da amostra. Uma tentativa adicional de correlacionar o conteúdo de ferro das amostras com deslocamentos do ponto de inflexão das feições espectrais não foi bem sucedida. Cumpre ressaltar, no entanto, que tais deslocamentos podem ser inferiores aos intervalos espectrais de 5 nm usados na aquisição dos dados, o que precisa ser ainda melhor investigado.

Dentro do contexto desta discussão, considerando uma certa homogeneidade do aspecto físico das superfícies das amostras em cada classe de rocha, pode-se concluir que a discriminação espectral destes litotipos no contexto geológico da Bacia do Parnaíba é influenciada em grande parte por seus constituintes menores, principalmente ferro e matéria orgânica. Com relação aos constituintes maiores, o gráfico das correlações revelou ser o conteúdo de Al_2O_3 a variável de maior influência na resposta espectral das rochas.

6.2 - A RESPOSTA ESPECTRAL DAS AMOSTRAS PULVERIZADAS

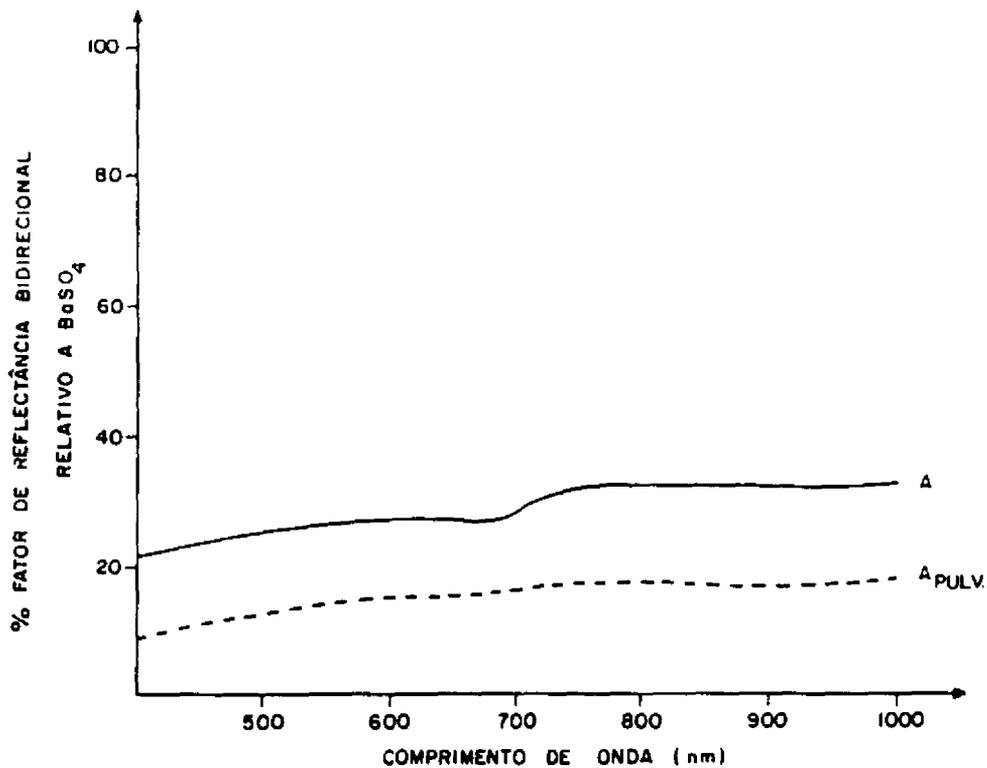
As 27 amostras utilizadas para obtenção das correlações foram pulverizadas. A Fig. 6.8 ilustra curvas espectrais obtidas sobre amostras inteiras e pulverizadas de arenito e folhelho. Conforme observado nesta figura, a reflectância do material pulverizado, quando comparada com a das amostras inteiras, é sempre menor. Tais resultados aparentemente são conflitantes com a maior parte dos trabalhos existentes na literatura. Vários autores observaram um aumento da reflectância com a diminuição do tamanho das partículas, embora tenham sempre utilizado em seus estudos apenas material pulverizado em diferentes classes de tamanho de partículas (Adams e Filice, 1967; Vincent e Hunt, 1968; Ross et al., 1969; Crowley, 1986).

Três hipóteses foram levantadas para explicar os presentes resultados:

- (a) a possibilidade de contaminação das amostras com ferro metálico, durante a sua moagem;
- (b) uma seleção mineralógica na parte superior da camada pulverizada em função da resistência dos minerais à pulverização e sua conseqüente separação em diferentes níveis nas camadas;
- (c) a influência significativa do arranjo dos minerais sobre a resposta espectral.

Com relação à primeira hipótese, pode-se destacar o trabalho de Baird (1984), que verificou uma pequena contaminação de suas amostras com ferro durante o processo de pulverização, embora tenha destacado que ela não afetou significativamente os seus resultados. Com relação à segunda hipótese, desde que após moídas, as amostras foram submetidas ao peneiramento, é possível que tenha havido um enriquecimento relativo de ferro na camada superior. Os minerais com menor dureza, principalmente os feldspatos ou mesmo o quartzo livre de impreg-

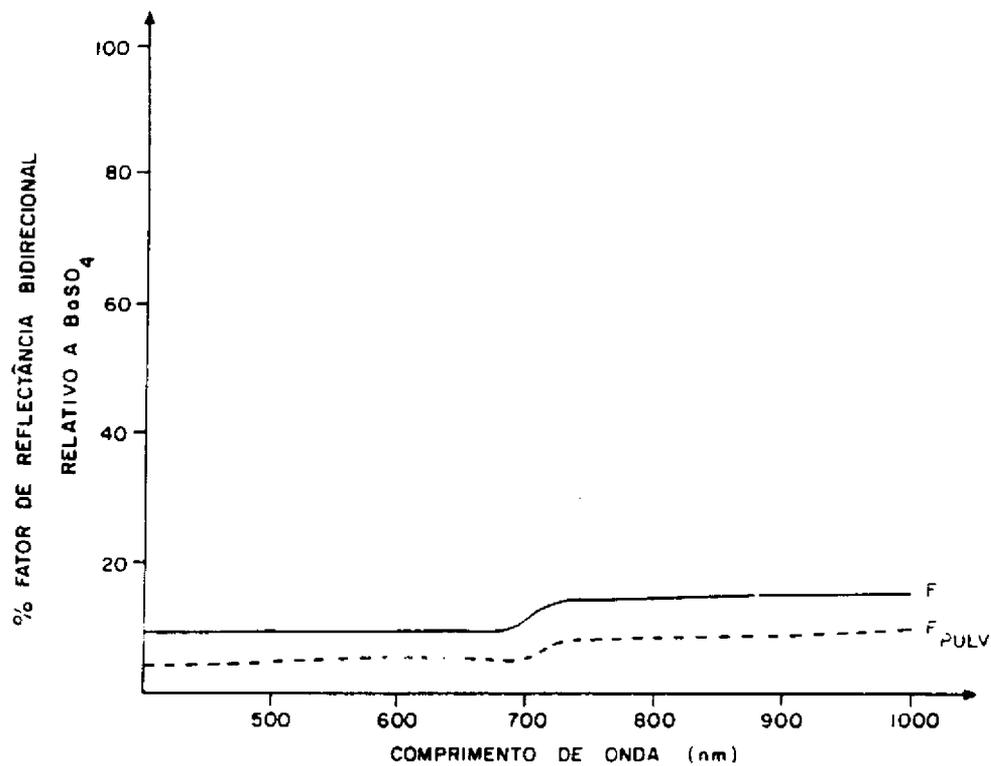
nações ferruginosas, teriam sido mais facilmente pulverizados e não ficariam retidos na peneira por sua menor granulometria. As frações mais grosseiras, sobre as quais ter-se-ia obtido os dados de reflectância, estariam mais enriquecidas em ferro, o que poderia explicar a menor reflectância obtida. Entretanto, estas duas hipóteses só poderão ser confirmadas com a efetivação de análises químicas adicionais sobre o material pulverizado. Caso elas não sejam confirmadas, os resultados obtidos neste trabalho, a exemplo do visto na Fig. 6.8, poderiam estar refletindo uma influência significativa do arranjo das partículas minerais sobre a resposta espectral das amostras, considerando o aspecto físico relativamente homogêneo de suas superfícies.



(a)

Fig. 6.8 - Curvas de reflectância espectral obtidas sobre amostras inteiras e sobre o material pulverizado correspondente de (a) arenitos e (b) folhelhos.

(continua)



(b)

Fig. 6.8 - Conclusão.

CAPÍTULO 7

A INFLUÊNCIA DO INTEMPERISMO NA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DAS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DA BACIA DO PARNAÍBA

As condições atmosféricas do ambiente terrestre introduzem efeitos de intemperismo em que processos físicos, químicos e orgânicos governam a composição e a textura da superfície das rochas aflorantes. Estes processos são seletivos e obviamente variam de acordo com a composição química da rocha parental e com as condições climáticas vigentes. Ignorando os efeitos orgânicos, a composição destas superfícies é resultante de um acúmulo de produtos de alteração oriundos da ação da água nos interstícios da rocha e em sua parte externa. Isto freqüentemente resulta na concentração de constituintes menores da rocha como minerais insolúveis sobre sua superfície, principalmente óxidos férricos e em menor extensão óxidos de manganês. Desta forma, a superfície intemperizada de uma rocha pode diferir em muito da porção fresca correspondente, o que implica também em modificações na resposta espectral obtida, conforme destacou Longshaw (1974).

O estudo sistemático da influência do intemperismo na reflectância espectral das rochas têm sido alvo de poucos trabalhos. Watson (1972), Kuntz et al. (1981) e Krohn (1986) verificaram, através de medições em laboratório sobre superfícies frescas e intemperizadas de diferentes tipos de rochas, que o intemperismo reduz a reflectância das amostras em todos os comprimentos de onda (400-2500 nm) e mascara suas feições espectrais. Blom et al. (1980) analisaram espectros de reflectância obtidos em campo (400-2500 nm) de rochas plutônicas e de debris adjacentes. Uma função de classificação, obtida a partir de uma análise discriminante sobre as amostras coletadas nos afloramentos, foi posteriormente utilizada para classificar os debris. Segundo estes autores, a boa classificação destes materiais dentro dos grupos de suas respectivas rochas parentais indica que o intemperismo físico não alterou significativamente o espectro de reflectância das litologias. Os efeitos do intemperismo foram também avaliados por Bothorel et al. (1984).

Eles obtiveram dados espectrais de laboratório a partir das faces intemperizadas de amostras de rochas situadas próximas a gossans, bem como de material pulverizado compreendendo sua porção não intemperizada. Um dos principais efeitos observados foi a redução do contraste de todas as feições espectrais entre 400 e 1100 nm

Mesmo em terrenos semi-áridos, como os da porção leste da Bacia do Parnaíba, onde a vegetação é mais esparsa, produtos erosionais normalmente predominam e as superfícies das rochas aflorantes são cobertas por uma fina camada de intemperismo composta por óxidos. A nível de sensoriamento remoto, é importante explorar as relações entre estes materiais e as rochas das quais eles derivam e determinar como as modificações na composição e textura das rochas, introduzidas pelo intemperismo, afetam a reflectância (Amos e Greenbaum, 1989). Por isso, amostras do pavimento dos afloramentos foram coletadas preservando-se, sempre que possível, a rugosidade natural e a fina camada intemperizada de suas superfícies. Dados espectrais foram então obtidos em laboratório com o espectrorradiômetro Optronics 740A, a partir das faces expostas e não-expostas à superfície destas amostras. O termo "patina" compreendendo as faces expostas, será adotado neste trabalho para expressar a camada externa delgada produzida pelo intemperismo na superfície da rocha. Medidas de reflectância de campo não foram efetivadas.

A Fig. 7.1 ilustra curvas de reflectância espectral obtidas a partir de um arenito argiloso de textura fina a média da porção superior da Formação Cabeças. A Fig. 7.2 mostra o local onde foi coletada a amostra para medida em laboratório. Uma fina camada oxidada reveste as disjunções poligonais vistas nesta foto, sendo responsável pela coloração vermelho-escuro das rochas. Removida esta camada, o arenito torna-se friável e decompõe-se facilmente numa areia esbranquiçada. A reflectância obtida sobre a face patinada da amostra, de acordo com a Fig. 7.1, é menor do que aquela obtida na porção menos intemperizada, o que é justificado pela superfície mais oxidada da primeira. A diferença varia em torno de 15%, principalmente na transição do visível para o infravermelho.

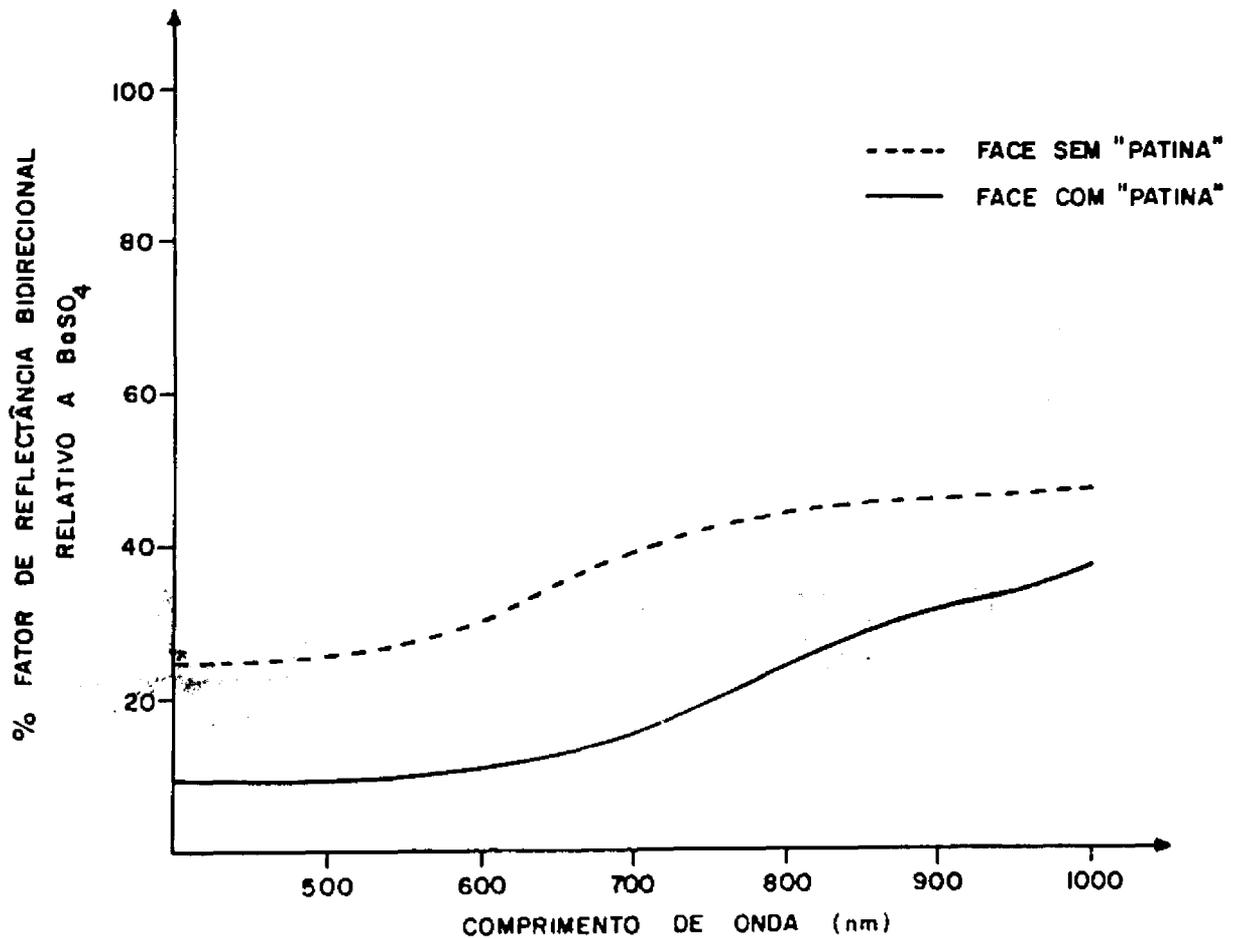


Fig. 7.1 - Reflectância obtida em laboratório a partir das faces de uma amostra de arenito argiloso da Formação Cabeças.

A Fig. 7.3 ilustra curvas de reflectância obtidas a partir de um arenito quartzoso de textura fina, coloração creme, pertencente à Formação Poti. O pavimento rochoso, onde foi coletada a amostra, e mostrado na Fig. 7.4. Novamente é nítida, a nível de amostra de mão, a presença da "patina", conferindo uma tonalidade amarelo-escura para esta rocha. A reflectância foi reduzida em aproximadamente 10% na transição do visível para o infravermelho.

A redução da reflectância, em função da ação do intemperismo, aparentemente é diferenciada para as rochas mais escuras, embora o formato das curvas ou as feições espectrais, em ambos os casos, não sejam fortemente mascaradas. É o que pode ser observado na Fig. 7.5, que ilustra dados de reflectância obtidos a partir de um folhelho pre-

to da Formação Longá. Para estas rochas não há diferenças marcantes, ao contrário do observado para os arenitos, na resposta espectral das faces expostas e não-expostas ao intemperismo. A baixa porosidade e impermeabilidade dos folhelhos não favorece a ação concentradora de óxidos da água como no caso dos arenitos. Mesmo quando esta concentração ocorre é fácil verificar, pelo menos para a porção visível do espectro, que a relação de contraste entre a reflectância da face intemperizada e menos intemperizada de um folhelho é inferior a obtida para um arenito.



Fig. 7.2 - Disjunções poligonais típicas dos arenitos da porção superior da Formação Cabeças.

- Foto batida nas proximidades da Cidade de Oeiras (PI).

Dados de reflectância também foram obtidos em laboratório a partir de debris adjacentes a afloramentos de rochas. Os debris correspondem ao acúmulo de fragmentos de rochas resultantes do desgaste físico ou mecânico das litologias, principalmente em climas áridos. O espectro de reflectância destes materiais, quando comparado com os das rochas das quais são derivados, não diferem significativamente, co-

mo observado na Fig. 7.6. A situação, entretanto, não é tão simples como parece. A Formação Pedra de Fogo, como exemplo, constitui-se predominantemente por folhelhos contendo níveis e concreções silicosas, fato este facilmente observado em afloramentos de corte de estrada (Fig. 7.7). Por serem mais resistentes ao desgaste mecânico e ao transporte ou lixiviação, as concreções passam a predominar no pavimento destes afloramentos, conforme mostra a Fig. 7.8. Conseqüentemente, a resposta espectral dos folhelhos cede lugar à reflectância do material silicoso, conforme observado na Fig. 7.9.

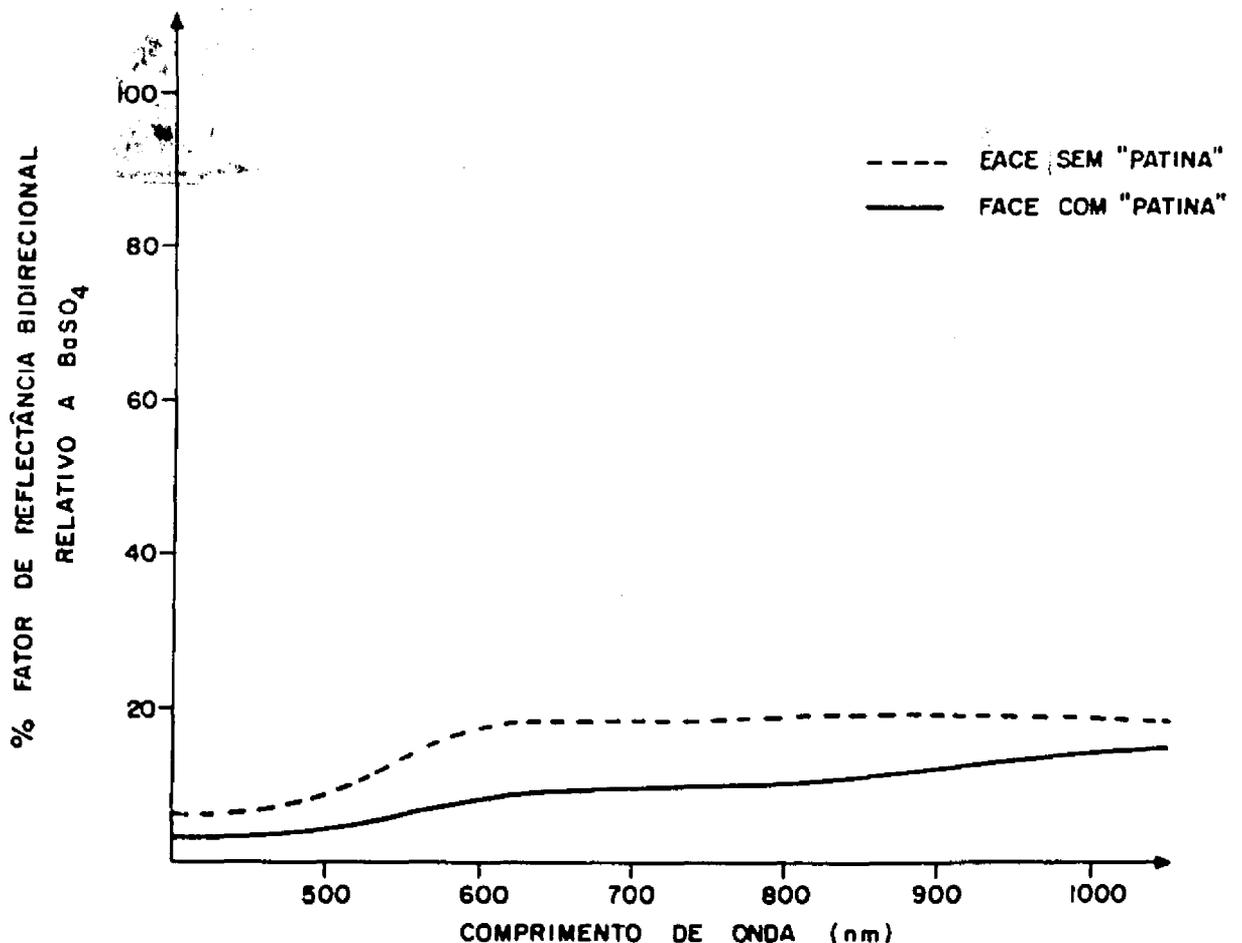


Fig. 7.3 - Reflectância obtida em laboratório a partir das faces de uma amostra de arenito quartzoso da Formação Poti.



Fig. 7.4 - Afloramento constituído por arenitos quartzosos da Formação Poti, situado a aproximadamente 40 km de Floriano (PI) em direção a Amarante (PI).

A comparação entre os espectros obtidos a partir dos testemunhos e das amostras de campo deve ser feita com muito cuidado, devido às possíveis variações litológicas existentes numa mesma seqüência estratigráfica. Como exemplo, as amostras coletadas em campo da Formação Pedra de Fogo possuem características petrográficas diferentes das obtidas nos poços. As reflectâncias, por conseguinte, são bem distintas (Fig. 7.9 e curva 2 da Fig. 6.7). Este não é o caso das amostras de campo das Formações Poti e Longá, cujas curvas das Figs. 7.3 e 7.5 (face sem "patina") são similares em magnitude de reflectância às das Figs. 6.7 (curva 3) e 5.8 (grupo G4) adquiridas a partir dos testemunhos. Um aspecto curioso a ressaltar, observando principalmente as curvas das Figs. 7.3, 7.5 e 7.6, é o fato delas se assemelharem, tendo um patamar liso no visível e uma elevação abrupta da reflectância entre 550 e 600 nm. Nas curvas do Capítulo 5 (Figs. 5.8 a 5.11), obtidas a partir das amostras de testemunhos, esta elevação ocorre entre 650 e 800 nm.

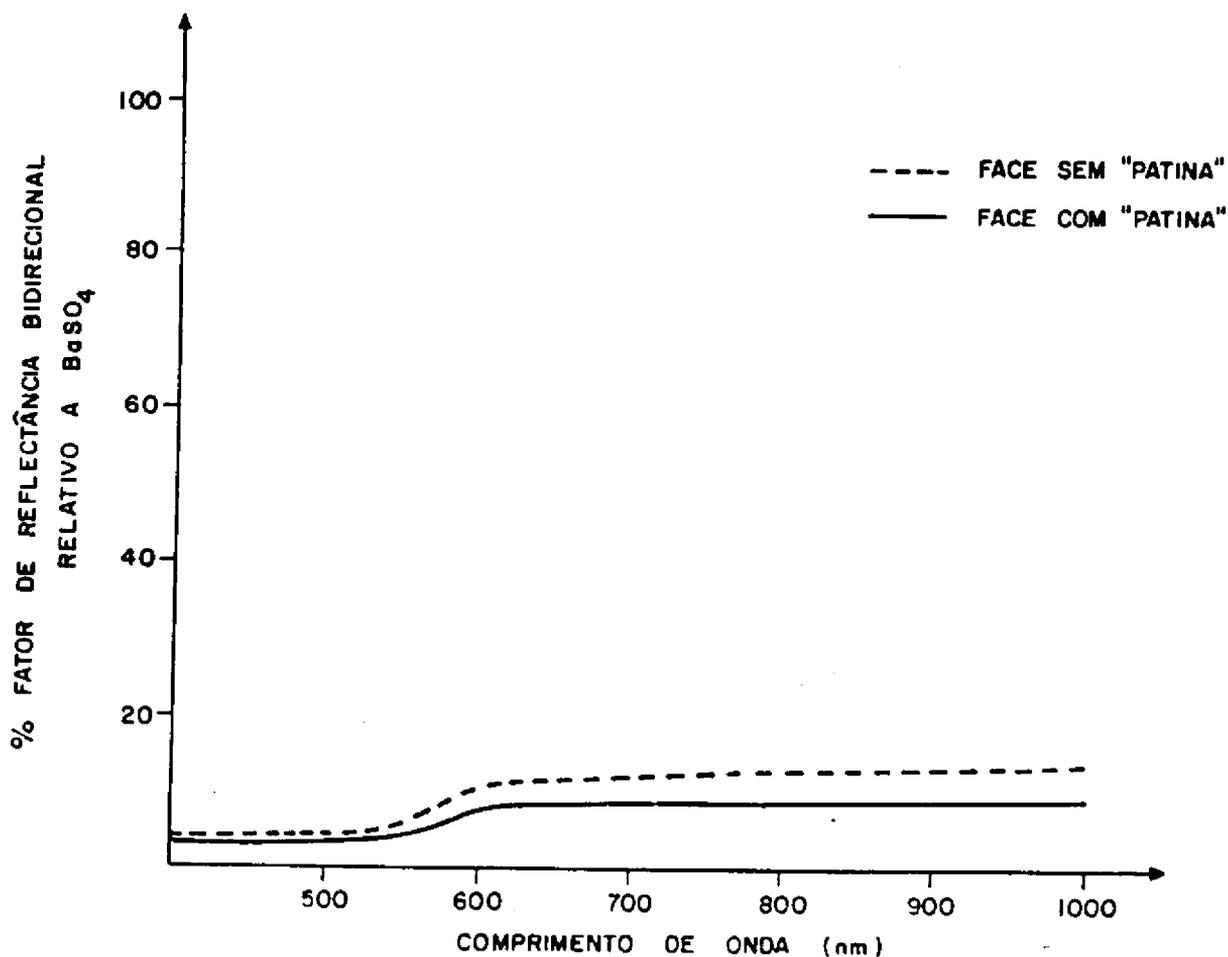


Fig. 7.5 - Reflectância obtida em laboratório a partir das faces de uma amostra de folhelho da Formação Longá.

Embora todas estas observações caracterizem os efeitos espectrais do intemperismo, a avaliação de sua influência na discriminação dos grupos de rochas da Bacia do Parnaíba permanece em aberto. A questão que surge é se a ação do intemperismo afetaria de forma significativa a separabilidade espectral entre grupos de rochas com relação a uma classe contendo material não intemperizado.

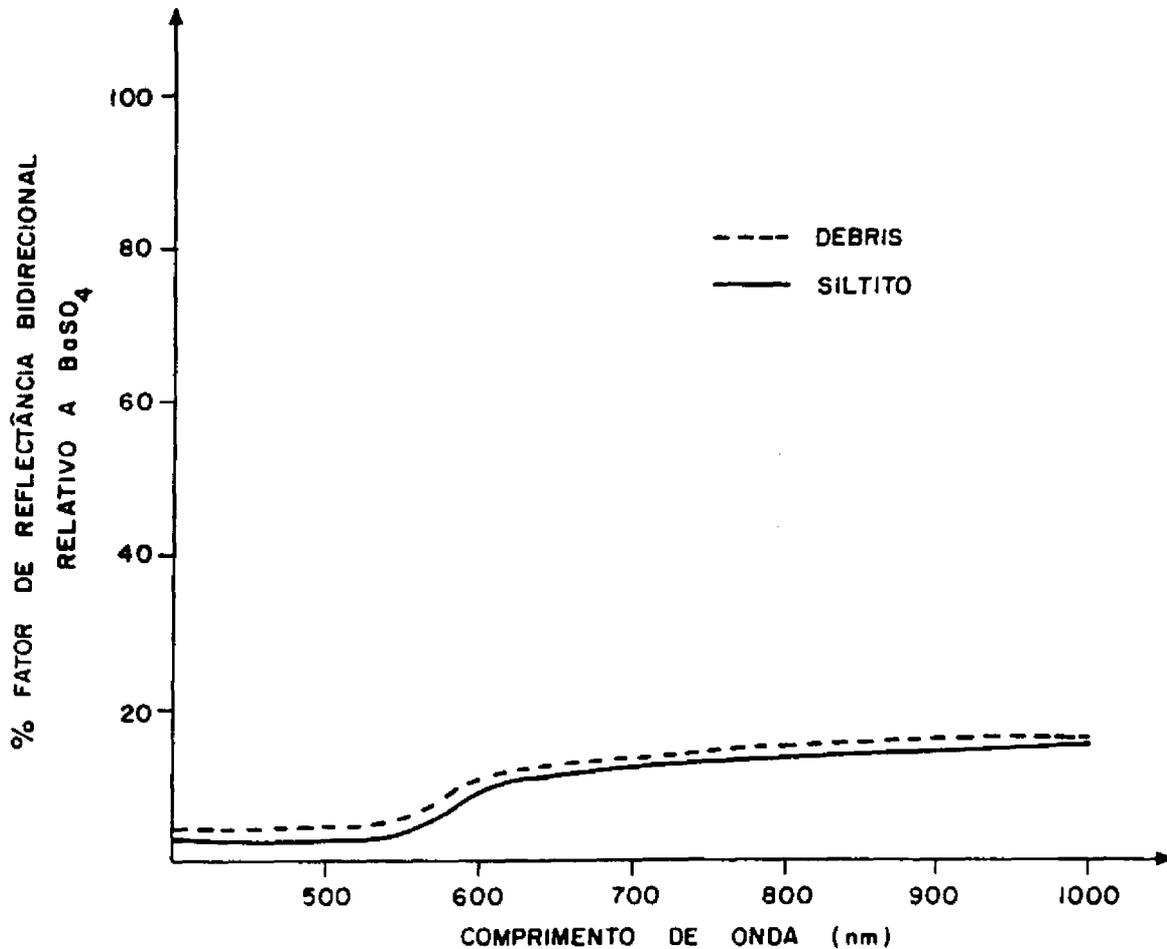


Fig. 7.6 - Reflectância obtida em laboratório a partir de uma amostra de silito avermelhado (Formação Motuca) e de debris adjacentes ao afloramento.

Para responder esta questão é necessário um conhecimento mais aprofundado das modificações físicas e químicas introduzidas pelo intemperismo, com relação aos diferentes litotipos. É necessário uma cuidadosa inspeção de campo para caracterizar os diversos tipos de expressões superficiais das rochas dentro de uma determinada unidade litológica e/ou dentre as demais. Neste contexto, a obtenção de dados espectrais de campo é imprescindível.



Fig. 7.7 - Afloramento em corte de estrada constituído por folhelhos roxos com níveis e concreções silicosas da porção basal da Formação Pedra de Fogo.

- Foto batida a 46 km de Teresina ao longo da BR-316 no sentido de Picos (PI).



Fig. 7.8 - Pavimento do afloramento em corte de estrada mostrado na Fig. 7.7, constituído por uma mistura de folhelho e concreções silicosas.

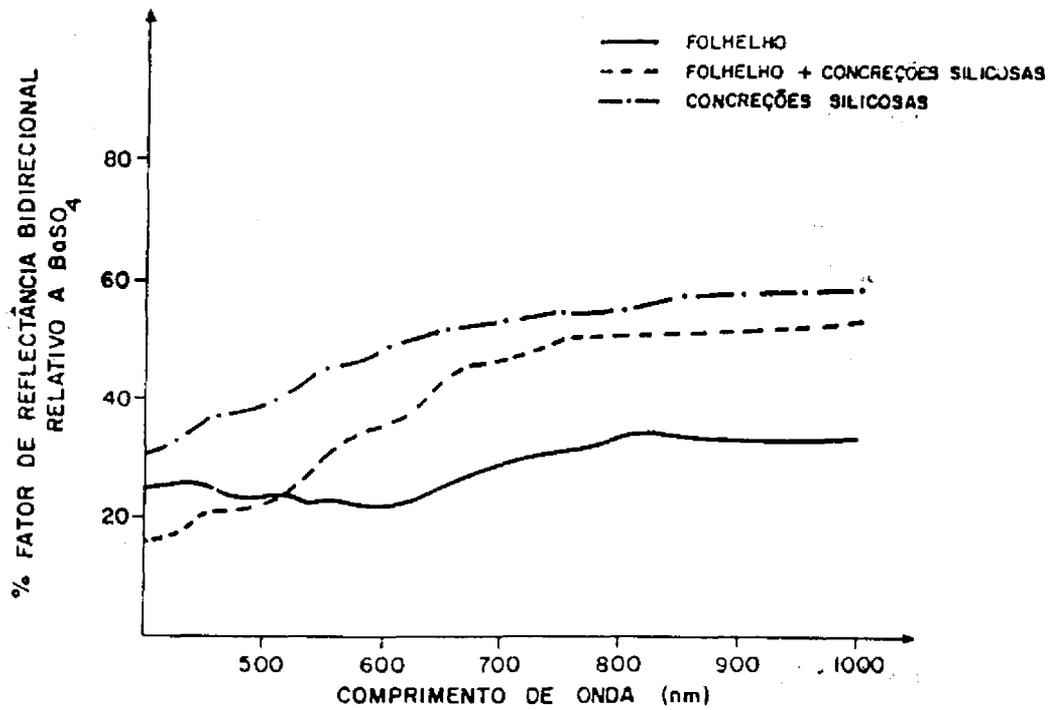


Fig. 7.9 - Reflectância obtida em laboratório a partir de uma amostra de folhelho roxo com concreções silicosas (Formação Pedra de Fogo).

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a limitação da faixa espectral usada neste trabalho (400 a 1000 nm), em que feições espectrais diagnósticas de alguns minerais e rochas não podem ser detectadas, pode-se antever uma maior potencialidade da utilização de dados de reflectância no intervalo entre 400 e 2500 nm para o correlacionamento estratigráfico de poços. Os caminhos que podem ser seguidos neste sentido, correlacionando dados espectrais de poços e de superfície, são mostrados na Fig. 8.1.

A parte central da Fig. 8.1 ilustra o correlacionamento estratigráfico espectral dos poços Testa Branca e Mangabeiras, baseado na Distância Generalizada de Mahalanobis normalizada, gerada a partir de uma função discriminante envolvendo 12 variáveis. Em relação à parte direita desta figura, a possibilidade de se adquirir dados em bandas estreitas na faixa 400-2500 nm propiciará a detecção ou distribuição estratigráfica espectral de argilas, gipso e minerais carbonáticos, com feições espectrais diagnósticas entre 2100 e 2400 nm. Estas feições poderão ser detectadas ou identificadas através de razões de bandas posicionadas adequadamente neste intervalo. As variáveis espectrais e a informação mineralógica resultante deverão ser plotadas em função da profundidade dos poços para ajudar a refinar o processo de correlacionamento dos mesmos.

No que se refere ao estudo da composição química sobre a resposta espectral das rochas, deve-se explorar as correlações existentes entre a reflectância e alguns constituintes químicos para tentar investigar a possibilidade do desenvolvimento de equações preditivas da composição, conforme feito por Baird (1984) para o caso de rochas graníticas. Poder-se-ia assim ter uma idéia da variabilidade química espectral de alguns constituintes, como o ferro e o cálcio.

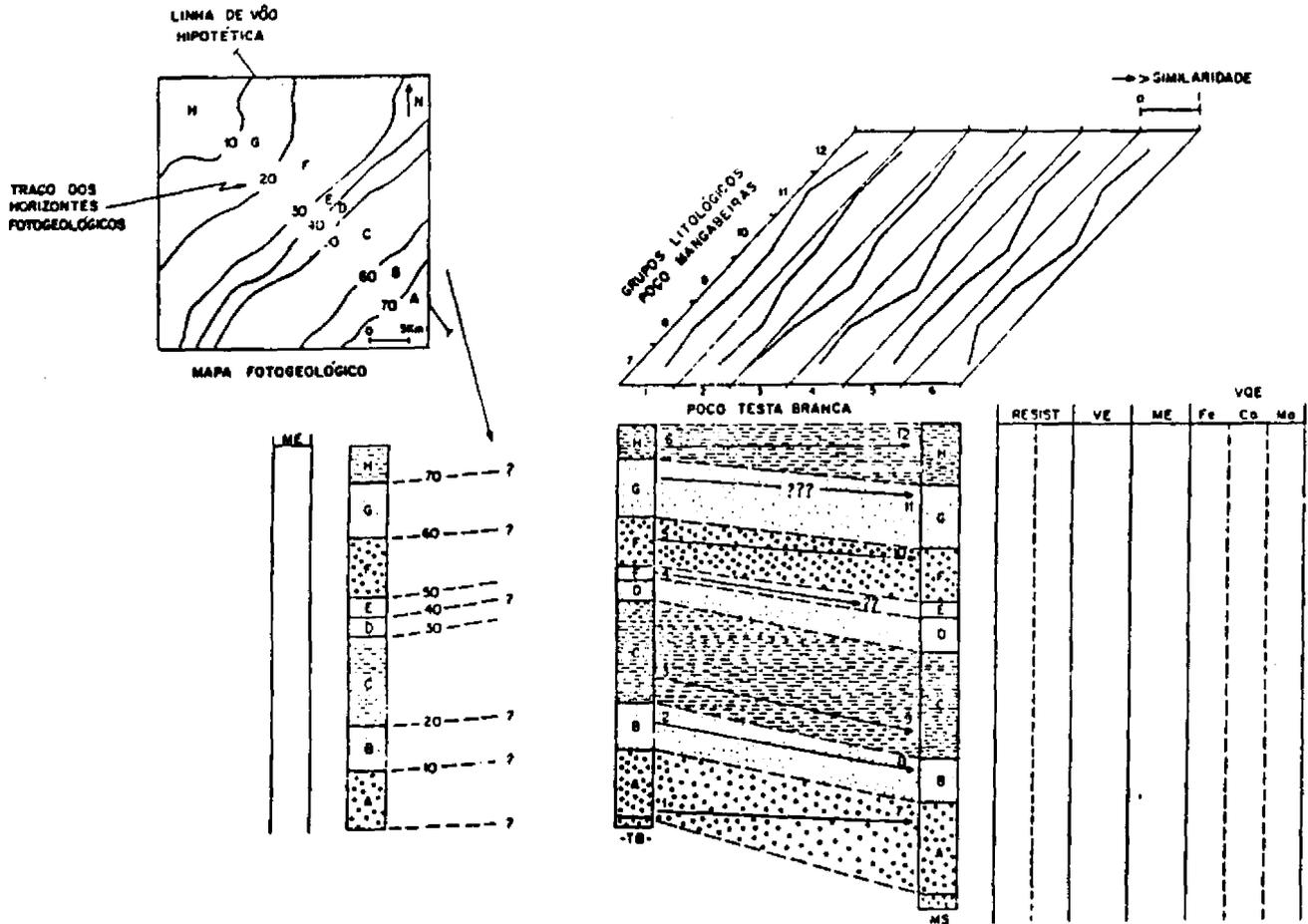


Fig. 8.1 - Potencialidades da utilização de dados de reflectância (400-2500 nm) para o correlacionamento estratigráfico de poços.

A simbologia usada compreende: **RESIST.** = resistividade elétrica; **VE** = variável espectral; **ME** = mineralogia espectral; **VQE** = variabilidade química espectral de constituintes como o Fe (ferro), Ca (cálcio) e M.O. (matéria orgânica). As unidades estratigráficas dos poços são: **A** = Grupo Serra Grande; **B** = Formação Itaim; **C** = Formação Pimenteira; **D** = Formação Cabeças; **E** = Formação Longá; **F** = Formação Poti; **G** = Formação Piauí; **H** = Formação Pedra de Fogo. Ver comentários sobre esta figura no texto deste capítulo.

A questão do intemperismo no processo de discriminação espectral das litologias é importante, mas não tem sido estudada de forma sistemática. Lang et al. (1987) utilizaram uma imagem TM/Landsat 5 para obter um mapa de interpretação fotogeológica nas Bacias de Wind River e Big Horn (Wyoming, EUA), a partir do qual construíram uma coluna estratigráfica incorporando informações sobre resistência à erosão dos estratos, espessura estratigráfica e características espectrais. Eles executaram uma linha de vôo, coincidente com a seção de referência usada na construção da coluna TM, para obter informações sobre a distribuição de alguns minerais espectralmente detectáveis. Um imageador de alta resolução foi utilizado. A situação é retratada hipoteticamente, no caso do presente trabalho, na porção esquerda da Fig. 8.1. A pergunta que surge é se é possível correlacionar as informações espectrais obtidas sobre a superfície intemperizada com àquelas adquiridas a partir dos poços. A possibilidade de utilizar estas informações em conjunto para construir cartas de correlação ou seções estratigráficas cruzadas justificam a necessidade de investigar este aspecto.

Finalmente, deve-se tentar, sempre que possível, analisar todos estes dados com outras fontes de informação disponíveis, tais como dados de resistividade elétrica e radiação gama.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

As conclusões obtidas no presente trabalho, são descritas abaixo.

- (1) O correlacionamento litoestratigráfico espectral de poços pode ser feito com sucesso, usando uma abordagem quantitativa e qualitativa envolvendo a aplicação seqüencial das seguintes técnicas estatísticas: Análise de Agrupamentos, Análise Fatorial, Análise Discriminante Linear e Correlação-Cruzada. A Distância Generalizada de Mahalanobis obtida de uma função discriminante gerada, principalmente, a partir de razões de bandas espectrais estreitas (10 nm de largura), constitui uma medida de similaridade de grupos litológicos adequada para o correlacionamento espectral dos poços. Melhores resultados são esperados, diante da possibilidade de ampliar a faixa espectral de aquisição dos dados de reflectância para 400-2500 nm. Neste intervalo de comprimento de onda, as feições espectrais de alguns minerais, não detectáveis entre 400 e 1000 nm, poderão ser muito úteis para otimizar a discriminação dos grupos litológicos presentes nos poços e, por conseguinte, o processo de correlacionamento litoestratigráfico espectral.
- (2) A discriminação espectral dos litotipos da Bacia do Parnaíba é influenciada em grande parte por seus constituintes menores, principalmente ferro e matéria orgânica. Dentre os constituintes maiores, o gráfico das correlações mostrou ser o conteúdo de Al_2O_3 a variável de maior influência na reflectância das rochas, embora não haja suporte na literatura para explicar a influência espectral deste constituinte sobre as rochas entre 400 e 1000 nm.

- (3) A ação do intemperismo reduz a reflectância das rochas. Entretanto, ainda não se sabe se ela afeta de forma significativa a separabilidade espectral dos grupos de rochas com relação a uma classe correspondente contendo material rochoso menos intemperizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, M.G. Imaging spectrometry: aircraft and space program. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Zurich, Sep. 1986. Proceedings. Zurich, ESA, 1986, v. 1, p. 231-234.
- ADAMS, J.R.; FILICE, A.L. Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders. Journal of Geophysical Research, 72(22): 5705-5715, 1967.
- AGUIAR, G.A. Revisão geológica da bacia do Maranhã. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., São Paulo, 1971. Anais. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, 1971, v. 3, p. 113-122.
- AMOS, B.J.; GREENBAUM, D. Alteration detection using TM imagery: the effects of supergene weathering in an arid climate. International Journal of Remote Sensing, 10(3):515-527, 1989.
- ANDERBERG, M.R. Cluster analysis for applications. New York, NY, Academic, 1973.
- ANDRADE, S.M. de; CAMARÇO, P.E.N. Geologia do carbonífero dos flancos nordeste da bacia do Paraná e sudoeste da bacia do Parnaíba e suas possibilidades uraníferas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, 1984, v. 3, p. 1174-1188.
- ANDRADE, S.M. de; DAEMON, R.F. Litoestratigrafia e bioestratigrafia do flanco sudoeste da bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia, 1974, v. 2, p. 129-137.
- ARONSON, J.R.; EMSLIE, A.G.; ALLEN, R.V.; McLINDEN, H.G. Studies of the middle and far-infrared spectra of mineral surfaces for applications in remote compositional mapping of the Moon and planets. Journal of Geophysical Research, 72(2):687-703, 1967.
- BAHIA, R.R. O petróleo na Amazônia: bacias paleozóicas do Amazonas e do Parnaíba - resultados e perspectivas exploratórias. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1., Belém, 1982. Anais. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, 1982, v. 2, p. 277-293.

- BAIRD, A.K. Rapid discrimination of granitic rock compositions by low-resolution near-infrared reflectance. Journal of Geophysical Research, 89(B4):2491-2496, 1984.
- BAILEY, G.B. Some opinions on remote sensing and geologic studies. In: WORKSHOP ON GEOLOGIC APPLICATION OF REMOTE SENSING TO THE STUDY OF SEDIMENTARY BASINS, Lakewood, CO, Jan. 1985. Report. Pasadena. JPL/NASA, 1985. (JPL Publication 85-44; E86-100002; NASA CR-176211).
- BLOM, R.G.; ABRAMS, M.J.; ADAMS, H.G. Spectral reflectance and discrimination of plutonic rocks in the 0.45 to 2.45 μm region. Journal of Geophysical Research, 85(B5):2638-2648, 1980.
- BOTHOREL, A.; CERVELLE, B.; CHOROWICZ, J.; TAMAIN, G.; ALEM, M. Spectral signatures (visible/near infrared) of rocks and ores. Modern Geology, 8(4):277-294, 1984.
- BURROUGHS. BURROUGHS: advanced statistical inquiry system (Basis): user's manual. Detroit, MI, 1975.
- CAPUTO, M.V. Glaciação neodevoniana no continente Gondwana ocidental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, 1984, v. 2, p. 725-739.
- CAPUTO, M.V.; LIMA, E.C. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, 1984, v. 2, p. 740-759.
- CAROZZI, A.V.; FALKENHEIN, F.U.H.; CARNEIRO, R.G.; ESTEVES, F.R.; CONTREIRAS, C.J.A. Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-Éocarbonífera da bacia do Maranhão. Rio de Janeiro, RJ, PETROBRÁS.CENPES, 1975. 48 p. (Série Ciência-Técnica-Petróleo. Seção: Exploração de Petróleo, nº 7).
- CONEL, J.E.; ABRAMS, M.J.; GOETZ, A.F.H. A study of alteration associated with uranium occurrences in sandstone and its detection by remote sensing methods. Pasadena, CA, JPL, 1978. (JPL Publication 78-66).

- COOLEY, W.W.; LOHNES, P.R. Multivariate data analysis. New York, NY, John Wiley, 1971. 364 p.
- CROWLEY, J.K. Visible and near-infrared spectra of carbonate rocks: reflectance variations related to petrographic texture and impurities. Journal of Geophysical Research, 91(85):5001-5012, 1986.
- CUNHA, F.M.B. da. Evolução paleozóica da bacia do Parnáiba e seu arco-bouço tectônico. Tese de Mestrado em Geologia. Rio de Janeiro, UFRJ, 1986. 107 p.
- CUNHA, F.M.B. da; CARNEIRO, R.G. Interpretação fotogeológica do centro-oeste da bacia do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., Belém, 1972. Anais. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, 1972, v. 3, p. 65-79.
- DAVIS, J.C. Statistics and data analysis in Geology. New York, NY, John Wiley, 1973. 550 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Maranhão. Brasília, 1987. 186 p. (Série Avaliação Regional do Setor Mineral, Boletim nº 44).
- DUGGIN, M.J. Factors limiting the discrimination and quantification of terrestrial features using remotely sensed radiance. International Journal of Remote Sensing, 6(1):3-27, 1985.
- DUGGIN, M.J.; PHILIPSON, W.R. Field measurement of reflectance: some majors considerations. Applied Optics, 21(15):2833-2840, Aug. 1982.
- EGBERT, D.D.; ULABY, F.T. Effect of angles on reflectivity. Photogrammetric Engineering, 38(6):556-564, 1972.
- EVERITT, B.S. Cluster analysis. London, Hernemann Educational Books, 1980. 136 p.
- EVERITT, B.S.; GOURLAY, A.J.; KENDELL, R.E. An attempt at validation of traditional psychiatric syndromes by cluster analysis. British Journal of Psychiatry, 119(5):399-412, 1971.

- FARIA JR., L.E. do C. Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo - Permiano - bacia do Maranhão. Tese de Mestrado em Geociências. Belém, UFPA, 1979. 57 p.
- FARIA JR., L.E. do C.; TRUCKENBRODT, W. Estromatólitos na Formação Pedra de Fogo, Permiano, bacia do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Camboriú, 1980. Anais. Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia, 1980a, v. 5, p. 3056-3067.
- _____. Estratigrafia e petrografia da formação Pedra de Fogo - Permiano da bacia do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Camboriú, 1980. Anais. Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia, 1980b, v. 2, p. 740-754.
- FARIAS, C.C.; MABESOONE, J.M. Argilominerais da Formação Longá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. Anais. Recife, Sociedade Brasileira de Geologia, 1978, v. 3, p. 1136-1140.
- FLEISS, J.L.; ZUBIN, J. On the methods of cluster analysis. Multivariate Behaviour Research, 4:235-250, July 1969.
- FORMAGGIO, A.R. Comportamento espectral de quatro solos do Estado de São Paulo nos níveis orbital, de campo e laboratório. Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 1983. 140 p. (INPE-2848-TDL/144).
- GAFFEY, S.J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35 - 2.55 μm) anhydrous carbonate mineral. Journal of Geophysical Research, 92(82):1429-1440, 1987.
- GAFFEY, S.J.; REED, K.L. Copper in calcite: detection by visible and near infrared reflectance. Economic Geology, 82(1):195-200, 1987.
- GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; PERDIZ, V.A. Fator de reflectância espectral bidirecional: determinações de alta precisão na faixa de 280 a 1100 nm. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 10., Belém, 1988. Resumos. Belém, Sociedade Brasileira de Geofísica, 1988.

- GOETZ, A.F.H.; ROWAN, L.C. Narrow-band IR radiometry for mineral identification: shuttle multispectral infrared radiometer (Smirr) aircraft test results. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Washington, June 1981. Proceedings. Washington, IEEE, 1981, v. 1, p. 345-347.
- GUTTMAN, L. Some necessary conditions for common factor analysis. Psychometrika, 19:149-161, Sept. 1954.
- HARMAN, H.H. Modern factor analysis. Chicago, The University of Chicago Press, 1970. 474 p.
- HOVIS, W.A. Infrared reflectivity of iron oxide minerals. Icarus, 4(4):425-430, Sept. 1965.
- HOVIS, W.A.; CALLAHAN, W.R. Infrared reflectance spectra of igneous rocks, tuffs and red sandstone from 0.5 to 22 μ . Journal of the Optical Society of America, 56(5):639-643, 1966.
- HUNT, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, 42(3):501-513, 1977.
- _____ Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: SIEGAL, B.S.; GILLESPIE, A.R., ed. Remote sensing in geology. New York, NY, John Wiley, 1980. Chap. 2. p. 5-45.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. silicate minerals. Modern Geology, 1(4): 283-300. 1970.
- _____ Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XI. sedimentary rocks. Modern Geology, 5(4):211-217, Apr. 1976.
- HUNT, G.R.; VINCENT, R.K. The behavior of spectral features in the infrared emission from particulate surfaces of various grain sizes. Journal of Geophysical Research, 73(18):6039-6046, 1968.
- INMAN, D.L. Measures for describing the size distribution of sediments. Journal of Sedimentological Petrology, 22(2):125-145, 1952.

- JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. Applied multivariate statistical analysis. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1982. 594 p.
- JORESKOG, K.G.; KLOVAN, J.E.; REYMENT, R.A. Geological factor analysis. New York, NY, Elsevier Scientific Publishing, 1976. 178 p.
- KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. Psychometrika, 23:187-200, June 1958.
- KENDALL, M.G. Multivariate analysis. New York, NY, McMillan, 1980.
- KROHN, M.D. Spectral properties (0.4 to 25 microns) of selected rocks associated with disseminated gold and silver deposits in Nevada and Idaho. Journal of Geophysical Research, 91(B1):767-783, 1986.
- KUNTZ, P.; SIMONIN, A.; GUYOT, G.; VERBRUGGHE, M. Analyse des signatures spectrales de formations rocheuses du Mont Lozère (France). In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, 3., Avignon, Dec. 1981. Actes. Avignon, ESA, 1981, p. 147-151.
- LACHENBRUCH, P.A. Discriminant analysis. New York, NY, Harfner Press, 1975. 128 p.
- LANG, H.R.; BAIRD, K.W. Spectral stratigraphy of the Fort Union/Wasatch Transition, Patrick Draw Geosat Petroleum test site, Wyoming. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Washington, June 1981. Proceedings. Washington, IEEE, 1981, v. 1, p. 589-594.
- LANG, H.R.; PAYLOR, E.D.; ADAMS, S. Remote stratigraphic analysis: combined TM and AIS results in the Wind River/Big Horn basin area, Wyoming. In: AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER DATA ANALYSIS WORKSHOP, Pasadena, June 1985. Proceedings. Pasadena, CA, JPL/NASA, 1985, p. 32-34. (JPL Publication 87-30).
- LANG, H.R., ADAMS, S.L.; CONEL, J.E.; MCGUFFIE, B.A.; PAYLOR, E.D.; WALKER, R.E. Multispectral remote sensing as stratigraphic and structural tool, Wind River Basin and Big Horn Basin areas, Wyoming. AAPG Bulletin, 71(4):389-402, 1987.

- LANSING JR., J.C. The Landsat sensor's status application and plans. Journal of Imaging Technology, 13(6):191-194, 1987.
- LIMA, E.A.A.; LEITE, J.F. Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba: integração geológica-metalogenética: relatório final. Recife, DNPM/CPRM, 1978. 437 p.
- LONGSHAW, T.G. Field spectroscopy of multispectral remote sensing: an analytical approach. Applied Optics, 13(6):1487-1493, June 1974.
- MARACCI, G. Spectral signatures measurements techniques employed at the J.R.C.: major problems and basic considerations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 1., Freiburg, July 1978. Proceedings. Freiburg, Germany, IAP, 1978, v. 1, p. 567-578.
- MARRS, R.W. Report of pre-Laramide stratigraphy group. In: WORKSHOP ON GEOLOGIC APPLICATION OF REMOTE SENSING TO THE STUDY OF SEDIMENTARY BASINS, Lakewood, CO, Jan. 1985. Report. Pasadena, CA, JPL/NASA, 1985, p. 73-76. (JPL Publication 85-44; E86-100002; NASA CR-176211).
- MATTOS, J.T.; VITORELLO, I. Aplicações de funções discriminantes na distinção de assinaturas espectrais de calcários e quartzitos em imagens MSS-Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, 1982. Anais. Brasília, INPE, 1982. v. 1, p. 77-82.
- MENESES, P.R. Avaliação e seleção de bandas do sensor "Thematic Mapper" do Landsat-5 para a discriminação de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semi-detalle. Tese de Doutorado em Geologia Geral. São Paulo, USP, 1986. 233 p.
- MESNER, J.C.; WOOLDRIDGE, L.C.P. The Maranhão study revision. Belém, PETROBRÁS.DENOR, 1967. 48 p. Relatório de consulta interna.
- MILLER, V.C.; MILLER, C.F. Photogeology. New York, NY, McGraw-Hill, 1961. 248 p.
- MILTON, E.J. A portable multiband radiometer for ground data collection in remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 1(2): 153-165, 1980.

- MILTON, E.J. Principles of field spectroscopy. International Journal of Remote Sensing, 8(12):1807-1827, 1987.
- NASA. High resolution imaging spectrometer: science opportunities for the 1990s. Pasadena, CA, NASA, 1987. (NASA TM 86129 v. 2c).
- NASSAU, K. Las causas del color. Scientific American, 51:56-72, June. 1980.
- PAYLOR, E.D. Foreland basin structures and remote sensing. In: WORKSHOP ON GEOLOGIC APPLICATION OF REMOTE SENSING TO THE STUDY OF SEDIMENTARY BASINS, Lakewood, CO, JAN. 1985. Report. Pasadena, CA, JPL/NASA, 1985. (JPL Publication 85-44; E86-100002; NASA CR-176211).
- PETRI, S.; FÚLFARO, V.J. Geologia do Brasil. São Paulo, EDUSP, 1983. 631 p.
- PIETERS, C.M. Strength of mineral absorption features in the transmitted component of near-infrared light: first results from RELAB. Journal of Geophysical Research, 88(B11):9534-9544, 1983.
- PINTO, I.D.; PURPER, I. Observations on Mesozoic Conchastraca from the North of Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia, 1974, v. 2, p. 305-316.
- PODWYSOCKI, M.H.; SEGAL, D.B.; ABRAMS, M.J. Use of multispectral scanner images for assesment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, Mining area. Economic Geology, 78(4):675-687, 1983.
- QUADROS, L.P. Distribuição bioestratigráfica dos Chitinozoa e Acritarchae na bacia do Parnaíba. Tese de Mestrado em Geologia. Rio de Janeiro, UFRJ, 1982.
- RAO, C.R. Linear statistical inference and its applications. New York, NY, John Wiley, 1973. 625 p.
- REGALI, M.S.P.; UESUGUÍ, N.; SANTOS, A.S. Palinologia dos sedimentos mesocenozóicos do Brasil. Boletim Técnico da Petrobrás, sv(3): 177-191, 1974.

- RODRIGUES, R. Estudo sedimentológico e estratigráfico dos depósitos silurianos e devonianos da bacia do Parnaíba. Belém, PA, PETROBRÁS. DENOR, 1962. 48 p. Relatório de consulta interna.
- ROSS, H.P.; ADLER, J.E.M.; HUNT, G.R. A statistical analysis of the reflectance of igneous rocks from 0.2 to 2.65 microns. Icarus, 11(1):46-54, July 1969.
- ROWAN, L.C.; KAHLE, A.B. Evaluation of 0.46 to 2.36 μ m multispectral scanner images of the East Tinting Mining District, Utah, for mapping hydrothermally altered rocks. Economic Geology, 77(2):441-452, 1982.
- RUMMEL, R.J. Applied factor analysis. Evanston, IL. Northwestern University Press, 1970. 617 p.
- SALISBURY, J.W.; HUNT, G.R. Martian surface materials: effect of particle size on spectral behavior. Science, 161(3339):365-376, July 1968.
- _____ Remote sensing of rock type in the visible and near infrared. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 9., Ann Arbor, Apr. 1974. Proceedings. Ann Arbor, MI. ERIM, 1974, v. 3, p. 1953-1958.
- SANTOS, E.J. dos; COUTINHO, M.G. da N.; COSTA, M.P. de A.; RAMALHO, R. A região de dobramentos nordeste e a bacia do Parnaíba, incluindo o cráton de São Luís e as bacias marginais. In: SCHOBENHAUS, C. ed. Geologia do Brasil. Brasília, DNPM, 1984. Cap. 4, p. 131-192.
- SAS INSTITUTE. SAS/SAT: guide for personal computers. Version 6. Cary, NC, SAS Institute, 1987. 1028 p.
- SCHWALLER, M.R. A geobotanical investigation based on linear discriminant and profile analysis of airborne Thematic Mapper simulator data. Remote Sensing of Environment, 23(1):23-34, 1987.
- SLATER, P.N. Remote sensing, optics and optical systems. New York, NY, Addison-Wesley, 1980. 515 p.
- STEVEN, M.D. Ground truth - an underview. International Journal of Remote Sensing, 8(7):1033-1038, 1987.

- VANE, G.; GOETZ, A.F.H. Introduction to the proceeding of the airborne imaging spectrometer (AIS) data analysis workshop. In: AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER DATA ANALYSIS WORKSHOP, Pasadena, CA, June 1987. Proceedings. Pasadena, CA, JPL/NASA, 1987, p. 1-21. (JPL Publication 87-30).
- VICENT, R.K.; HUNT, G.R. Infrared reflectance from mat surfaces. Applied Optics, 7(1):53-58, 1968.
- VICENT, R.K.; PILLARS, W.W. Skylab S-192 ratio codes of soil, mineral and rock spectra for ratio image selection and interpretation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 9., Ann Arbor, Apr. 1974. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1974, v. 2, p. 875-896.
- WATSON, R.D. Spectral reflectance and photometric properties of selected rocks. Remote Sensing of Environment, 2(2):95-100, Feb. 1972.
- WESTER, K.; LUNDÉN, B. A statistical approach to select the optimal wavelength bands for separating rocks in the wavelength 0.4 to 2.3 μm . In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Zurich, June 1986. Proceedings. Zurich, ESA, 1986, v. 1, p. 491-496.
- WHITNEY, G.; ABRAMS, M.J.; GOETZ, A.F.H. Mineral discrimination using a portable ratio-determining radiometer. Economic Geology, 78(4): 688-698, 1983.

APÊNDICE A

ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

As diversas técnicas de Análise de Agrupamentos existentes têm por objetivo determinar como indivíduos ou objetos podem ser subdivididos em grupos, com base em um número de medidas características associadas. Ao contrário da Análise Função Discriminante, que pressupõe a existência de grupos definidos, a Análise de Agrupamentos visa descobrir os grupos em primeira instância. Ela pode ser usada como um meio de descrição ou sumarização, bem como para reduzir o volume de um amplo conjunto de dados. O método é essencialmente não-estatístico, pois não possui teoria de distribuição ou testes de significância associados (Everitt, 1980).

Dentre os diversos métodos existentes, as técnicas de agrupamentos hierárquicas são, provavelmente, as mais comumente usadas. Elas podem ser subdivididas em Métodos Aglomerativos e Métodos Divisivos. Os primeiros são processados através de uma série de fusões sucessivas de n indivíduos para compor um determinado número de grupos, enquanto que os últimos dividem um conjunto de n indivíduos sucessivamente para partições menores.

O primeiro estágio da técnica hierárquica aglomerativa "Group Average Clustering", adotada no presente trabalho, é converter uma matriz $m \times p$ de observações em uma matriz $m \times n$ de coeficientes de similaridade (p.ex., coeficiente de correlação) ou distância (p.ex., Distância Euclidiana, Distância de Mahalanobis) entre indivíduos. A Distância Euclidiana, o coeficiente utilizado neste trabalho, é a mais comumente usada medida de distância. Ela é calculada pela seguinte expressão:

$$d_{ij} = \left\{ \sum_{K=1}^P (x_{iK} - x_{jK})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.1})$$

onde

d_{ij} = distância entre os indivíduos i e j ;

x_{iK} = valor de K th variável para i th indivíduo;

x_{jK} = valor da K th variável para j th indivíduo.

Um exemplo de operação da técnica hierárquica aglomerativa, utilizando a Distância Euclidiana, é dado por Everitt (1980). Considere a matriz $[x]$ abaixo com 4 observações sobre 6 indivíduos:

$$[x] = \begin{bmatrix} 6,0 & 3,0 & 4,0 & 5,0 \\ 2,0 & 3,0 & 5,0 & 4,0 \\ 5,0 & 4,0 & 6,0 & 3,0 \\ 9,0 & 1,0 & 1,0 & 8,0 \\ 8,0 & 2,0 & 0,0 & 9,0 \\ 8,0 & 0,0 & 1,0 & 8,0 \end{bmatrix}$$

Assume-se inicialmente que cada indivíduo compõe um grupo e reduz-se o número de grupos em diversos estágios, pela fusão de indivíduos de acordo com os valores da Distância Euclidiana. A Distância Euclidiana entre os indivíduos 1 e 2, por exemplo, é obtida através de:

$$d_{12} = [(6,0 - 2,0)^2 + (3,0 - 3,0)^2 + (4,0 - 5,0)^2 + (5,0 - 4,0)^2]^{\frac{1}{2}} = 4,24$$

Repetindo este procedimento para todos os possíveis pares de indivíduos, a matriz de distância $[D1]$ será obtida:

$$[D1] = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} (d_{12}) \quad (d_{13}) \quad (d_{14}) \quad (d_{15}) \quad (d_{16}) \\ \left[\begin{array}{cccccc} 0,0 & 4,24 & 3,16 & 5,57 & 6,08 & 5,57 \\ & 0,0 & 3,46 & 9,22 & 9,33 & 8,77 \\ & & 0,0 & 8,66 & 9,22 & 9,66 \\ & & & 0,0 & 2,0 & 1,41 \\ & & & & 0,0 & 1,41 \\ & & & & & 0,0 \end{array} \right] \end{array}$$

Agrupar-se então os pares de indivíduos com menor Distância Euclidiana. Examinando a matriz $[D1]$, pode-se observar que d_{46} e d_{56} possuem os menores valores e podem assim integrar um novo grupo.

O passo seguinte é calcular uma nova matriz de distância $[D2]$, mostrando distâncias entre indivíduos ou entre indivíduos e grupos:

$$[D2] = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad (56) \\ \left[\begin{array}{ccccc} 0,0 & 4,24 & 3,16 & 5,56 & 5,33 \\ & 0,0 & 3,46 & 9,22 & 9,05 \\ & & 0,0 & 8,66 & 8,94 \\ & & & 0,0 & 1,71 \\ & & & & 0,0 \end{array} \right] \end{array}$$

A distância entre o indivíduo 1 e o grupo contendo os indivíduos 5 e 6 é definida por:

$$\begin{aligned} d_{1,(56)} &= 1/2 (d_{15} + d_{16}) \\ &= 1/2 (6,08 + 5,57) \\ &= 5,83 \end{aligned}$$

A.4

As fusões seguintes originarão as matrizes [D3] e [D4], seguindo procedimento similar ao anterior:

$$[D3] = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & (456) \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ (456) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,0 & 4,24 & 3,16 & 5,74 \\ & 0,0 & 3,46 & 9,11 \\ & & 0,0 & 8,85 \\ & & & 0,0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

NOVOS GRUPOS	1	2	3
MEMBROS	2	1,3	4,5,6

$$[D4] = \begin{matrix} & 2 & (1,3) & (456) \\ \begin{matrix} 2 \\ (13) \\ (456) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,0 & 3,85 & 5,74 \\ & 0,0 & 8,98 \\ & & 0,0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

NOVOS GRUPOS	1	2
MEMBROS	1,2,3	4,5,6

A fusão de todos os indivíduos em dois grupos compreende o estágio final do processo, que pode ser representado graficamente através de dendogramas. Eles são úteis para a decisão de qual número de grupos é o mais indicado para representar a estrutura dos dados, um dos principais problemas das técnicas de agrupamentos.

APÊNDICE B

ANÁLISE FATORIAL (TIPO R OU MÉTODO FATOR-PRINCIPAL)

"Análise Fatorial" é um termo genérico usado para exprimir uma variedade de procedimentos, cujo objetivo é analisar as intercorrelações dentro de um conjunto de variáveis (procedimentos do tipo R) ou objetos (procedimentos do tipo Q) (Cooley e Lohnes, 1971; Joreskog et al., 1976).

O propósito da Análise Fatorial Q é essencialmente o mesmo da análise de Agrupamentos, mas críticas têm sido feitas quanto ao fato da correlação Q ser uma medida pobre de similaridade, de difícil interpretação e que exige um maior custo computacional em relação a outras técnicas (Fleiss e Zubin, 1969; Davis, 1973).

A maior parte das aplicações referentes à Análise Fatorial têm envolvido procedimentos do tipo R. A complexidade total de um conjunto de dados é reduzida pela transformação das variáveis em um pequeno número de fatores interdependentes, que normalmente contém a mesma quantidade de informação do amplo conjunto de observações originais. Comumente, tem-se utilizado as Principais Componentes de uma matriz de correlação (termo R), convertendo-as em fatores que são subsequentemente rotacionados de acordo com algum critério, como o Varimax (Harman, 1970). É o que faz em suma o programa FACTOR (Burroughs, 1975), utilizado no presente trabalho.

O programa FACTOR fornece, dentre outros, os seguintes dados básicos:

- (a) traço da matriz de correlação. Esta matriz opcionalmente pode ser utilizada como dado de entrada para o programa ou ser calculada a partir do conjunto original de dados;

B.2

- (b) autovalores e a proporção de sua variação total;
- (c) autovetores;
- (d) fatores de peso ("factor loading") e a matriz fatorial não rotacionada;
- (e) comunalidades;
- (f) matriz fatorial rotacionada pelo critério Varimax.

B.1 - O CÁLCULO DO TRAÇO

O traço de uma matriz é definido pela soma de seus elementos diagonais. Considerando a matriz de correlação $[A]$ abaixo:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad T[A] = a_{11} + a_{22} \quad (B.1)$$

Este cálculo é útil para conferir a operação de obtenção dos autovalores, pois a soma destes últimos é sempre igual ao traço da matriz original.

B.2 - O CÁLCULO DOS AUTOVALORES

O determinante da matriz pode ser usado para o cálculo dos autovalores e autovetores. Considere a equação abaixo expressa na forma matricial:

$$[A] [x] = \lambda [x] \quad (B.2)$$

onde

B.3

λ = constante

$[x]$ = vetor de X's desconhecidos.

A Equação (B.2) pode ser reescrita na forma:

$$([A] - \lambda [I]) [x] = [0] \quad (B.3)$$

onde

$[I]$ = matriz identidade do mesmo tamanho de $[A]$

Escrevendo de forma convencional:

$$(A_{11} - \lambda) x_1 + A_{12} x_2 = 0$$

$$A_{21} x_1 + (A_{22} - \lambda) x_2 = 0$$

Assume-se que existem outras soluções para estas equações, considerando a possibilidade que o vetor de X's não seja zero. Desta forma, o determinante da matriz $[A]$ deve ser zero ou:

$$[A - \lambda I] = \begin{bmatrix} A_{11} - \lambda & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (B.4)$$

Normalmente, conhece-se os valores de A_{ij} da matriz. O interesse reside em determinar os valores de λ , que constituem os autovalores. É preciso então encontrar o determinante da matriz $[A]$, que será igual a:

B.4

$$D[A] = ((A_{11} - \lambda)(A_{22} - \lambda) - A_{21} \cdot A_{12}) = 0 \quad (B.5)$$

Este cálculo vai gerar uma equação quadrática do tipo $\lambda x^2 + \alpha_1 \lambda + \alpha_2 = 0$, cuja solução implicará na obtenção dos autovalores desejados ($\lambda_1 \cdot \lambda_2$). A somatória de λ_1 e λ_2 deve ser igual ao traço da matriz [A]. A proporção de variação total dos autovalores pode ser obtida dividindo-os pelo traço da matriz:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_1^i \text{ (Eq. B.5)}}{T[A]} \quad (B.6)$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_2^i \text{ (Eq. B.5)}}{T[A]}$$

onde $\lambda_1 + \lambda_2 = 1,0$ ou 100%, o que define sua percentagem cumulativa.

B.3 - O CÁLCULO DOS AUTOVETORES

Pode-se reescrever a Equação B.3, para o caso de uma matriz 2 x 2, na forma de:

$$\begin{bmatrix} A_{11} - \lambda_1 & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} - \lambda_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (B.7)$$

onde λ_1 é o primeiro autovalor obtido de B.5.

Substituindo λ_1 na matriz e determinando os valores de X 's nas equações simultâneas, serão definidos os primeiros autovetores (x_1 e x_2) associados com o primeiro autovalor (λ_1). Raciocínio idêntico é usado para encontrar-se os autovetores associados a λ_2 . As observações originais podem então serem projetadas sobre os eixos principais e, conseqüentemente, convertidos em escores. Isto é feito multiplicando-se os dados originais das diversas variáveis analisadas pelos elementos correspondentes dos autovetores. Pode-se dizer, resumidamente, que os autovetores associados com autovalores diferentes de zero de uma matriz de correlação representam um conjunto de eixos ortogonais, através dos quais os pontos-dados podem ser referenciados. Eles formam um conjunto de vetores linearmente independentes, resultantes de uma combinação linear das variáveis originais. A magnitude da variância dos pontos-dados é dada pelos autovalores. O autovetor associado ao autovalor determina a direção de máxima variância dos pontos-dados. O autovetor associado com o segundo maior autovalor indica a direção de máxima variação ortogonal ao primeiro autovetor; e assim por diante. A dimensionalidade do espaço é dada pelo número de autovalores diferentes de zero (Joreskog et al., 1976).

B.4 - OBTENÇÃO DOS FATORES DE PESO

Para dar continuidade a efetivação da Análise Fatorial é necessário converter os autovetores, de forma que seu comprimento represente a magnitude do autovalor. A conversão não afetará a direção do vetor, mas apenas seu comprimento. Ela é feita multiplicando-se cada elemento dos autovetores pela raiz quadrada dos autovalores correspondentes. Desta forma, para $[A]_{2 \times 2}$:

VARIÁVEIS	FATORES RETIDOS	
	1	2
1	$x_1 \sqrt{\lambda_1}$	$x_1' \sqrt{\lambda_2}$
2	$x_2 \sqrt{\lambda_1}$	$x_2' \sqrt{\lambda_2}$

(B.8)

onde

x_1 e x_2 = elementos do autovetor de número 1

x'_1 e x'_2 = elementos do autovetor de número 2

λ_1 e λ_2 = autovalores da Equação (B.5).

O resultado é um "Fator", um vetor que tem peso proporcional à quantidade de variância total que ele representa. Os elementos associados a um Fator são denominados Fatores de Peso ("Factors Loadings"). Eles na verdade são os elementos que compõem a matriz fatorial não rotacionada. Se a conversão é feita corretamente, a soma dos quadrados dos fatores de peso associados a um autovalor será igual ao valor deste último. Deve-se ressaltar que as orientações destes fatores são as mesmas dos autovetores originais e que seus comprimentos são iguais a raiz quadrada dos autovalores correspondentes.

B.5 - AS COMUNALIDADES

Se os elementos da matriz fatorial não rotacionada forem elevados ao quadrado e somados no contexto de cada variável, o resultado representará a quantidade de variância de cada variável retida nos fatores. Este resultado é denominado de comunalidade, simbolicamente representado por h_j^2 , onde j compreende a j th variável. Assim, para a matriz fatorial não rotacionada vista anteriormente, h_j^2 será igual a:

		h_j^2	
		1	2
VARIÁVEIS	1	$(x_1 \cdot \sqrt{\lambda_1})^2$	$(x_1 \cdot \sqrt{\lambda_1})^2 + (x'_1 \cdot \sqrt{\lambda_2})^2$
	2	$(x_2 \cdot \sqrt{\lambda_2})^2$	$(x_2 \cdot \sqrt{\lambda_1})^2 + (x'_2 \cdot \sqrt{\lambda_2})^2$

(B.9)

onde

x_1 e x_2 = elementos do autovetor número 1

x'_1 e x'_2 = elementos do autovetor número 2

λ_1 e λ_2 = autovalores (Eq. B.5).

Se m fatores forem extraídos de uma matriz $m \times m$, as comunalidades serão iguais as variâncias originais. Caso contrário, elas serão menores, podendo assim fornecer um índice para a eficiência do processo de redução dos fatores. Desta forma, a magnitude da comunalidade depende do número de fatores retidos e esta escolha é um dos principais problemas da Análise Fatorial.

B.6 - A ROTACÃO VARIMAX

Devido ao fato que as posições dos P eixos fatoriais ortogonais no espaço m , necessários para a explanação dos dados, são pressionados por $m - p$ eixos desnecessários, o significado dos fatores pode tornar-se difícil de ser interpretada. A solução para este problema é rotacioná-los e encontrar uma melhor posição para eles. O critério Varimax, proposto por Kaiser (1958), é o mais popular de todos os procedimentos rotacionais analíticos. Seu objetivo é mover cada um dos eixos fatoriais para posições em que as projeções de cada variável dentro destes eixos estejam próximas das extremidades ou origem do espaço amostral (1 ou 0). A rotação Varimax visa maximizar a função:

$$V = m \sum_{P=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{jP}/h_j)^4 - \sum_{P=1}^m \left(\sum_{j=1}^n b_{jP}^2/h_j^2 \right)^2 \quad (B.10)$$

onde

V = variância total

B.8

n = número de variáveis j

b_{jp} = Fator de Peso p rotacionado correspondente a variável j

h_j^2 = comunalidade do Fator P sobre a variável j .

Primeiro, há necessidade de normalizar os fatores de peso, conforme discutido por Harman (1970). Os fatores de peso normalizados de uma variável z_j para um determinado par de fatores p e q são obtidos por:

$$x_j = a_{jp}/h_j \tag{B.11}$$

$$y_j = a_{jq}/h_j$$

onde

x_j e y_j = fatores de peso normalizados

a_j = fatores de peso

h_j = raiz quadrada da comunalidade.

A matriz fatorial rotacionada é obtida pela transformação:

$$[X_j \ Y_j] = [x_j \ y_j] \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \tag{B.12}$$

matriz de transformação

onde

X_j, Y_j = fatores de peso rotacionados correspondentes a variável j

x_j, y_j = fatores de peso normalizados

φ = ângulo de rotação no plano dos fatores p e q .

Seja $u_j = x_j^2 - y_j^2$ e $v_j = 2 x_j \cdot y_j$. O ângulo de rotação φ , necessário para obter-se um V máximo, será igual a:

$$\tan 4\varphi = \frac{D - 2AB/n}{C - (A^2 - B^2)/n} \quad (\text{B.13})$$

onde

$$A = \sum u_j$$

$$B = \sum v_j$$

$$C = \sum (u_j^2 - v_j^2)$$

$$D = 2 \sum u_j \cdot v_j$$

É necessário ressaltar também que todo o processo, em termos computacionais, é feito pela análise de todos os possíveis pares de fatores. A determinação de φ para cada um dos possíveis pares de fatores retidos é chamada Ciclo. O Ciclo é repetido até que um novo cálculo da Equação (B.11) convirja para um valor estável.

O esquema rotacional Varimax preserva a ortogonalidade dos eixos fatoriais. A rotação dos fatores não influencia o compri-

mento dos vetores representando as variáveis e as comunalidades não se modificam. A aquisição dos escores sobre os fatores é mais complexa do que no caso das Principais Componentes. Os escores fatoriais representam estimativas das contribuições dos vários fatores para cada observação original, podendo resultar em valores que não são únicos. O fato é que pouca atenção tem sido dada na literatura para o cálculo dos escores fatoriais, quando comparada por exemplo, com a discussão sobre a aquisição dos escores Principais Componentes (Davis, 1973).

APÊNDICE C

ANÁLISE FUNÇÃO DISCRIMINANTE

O objetivo da análise Função Discriminante é determinar a extensão e a maneira pela qual dois ou mais grupos de indivíduos, previamente definidos, podem ser diferenciados com base em seu conjunto de variáveis dependentes. O conjunto original das medidas sobre cada indivíduo é transformado, através de uma função, em um escore discriminante simples. Este último representa a posição deste indivíduo ou amostra ao longo de uma linha definida por esta função (Davis, 1973). Esta função discriminante poderá ser então usada para classificar novas observações. Os novos indivíduos serão alocados para as populações mais próximas, onde a proximidade constitui uma medida de probabilidade e não uma distância métrica (Kendall, 1980).

O programa DISCRIM (SAS, 1987), utilizado no presente trabalho, fornece a seguinte saída de dados:

- (a) a matriz de covariância para cada grupo e a matriz de dispersão;
- (b) a inversa da matriz de dispersão;
- (c) as constantes e os coeficientes da função discriminante;
- (d) a matriz de classificação;
- (e) a Distância de Mahalanobis.

C.1 - CÁLCULO DA MATRIZ DE COVARIÂNCIA E MATRIZ DE DISPERSÃO

Considere os grupos A e B caracterizados pelas variáveis j e k . O cálculo da matriz de covariância $[S_p]$ para o grupo A será igual a:

$$[SPA] = \sum_{i=1}^{na} (A_{ij} \cdot A_{iK}) - \frac{\sum_{i=1}^{na} A_{ij} \sum_{i=1}^{na} A_{iK}}{na} \quad (C.1)$$

onde

A_{ij} = ith observação sobre a variável j no grupo A

A_{iK} = ith observação sobre a variável K no grupo A

na = número de observações do grupo A.

Similarmente, a matriz da covariância para o grupo B será obtida por:

$$[SPB] = \sum_{i=1}^{nb} (B_{ij} B_{iK}) - \frac{\sum_{i=1}^{nb} B_{ij} \sum_{i=1}^{nb} B_{iK}}{nb} \quad (C.2)$$

De posse de [SPA] e [SPB] pode-se agora calcular a matriz de dispersão $[S_p^2]$:

$$[S_p^2] = \frac{[SPA] \quad [SPB]}{na + nb - 2} \quad (C.3)$$

A inversão da matriz $[S_p^2]$ é feita através do cálculo da expressão:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}}_{\text{matriz } [S_p^2]} \underbrace{\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix}}_{\text{inversa da matriz } [S_p^2]} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{matriz identidade}} \quad (C.4)$$

onde

$$a_{11} \cdot x_{11} + a_{12} \cdot x_{21} = 1$$

$$a_{21} \cdot x_{11} + a_{22} \cdot x_{21} = 0$$

$$a_{11} \cdot x_{12} + a_{12} \cdot x_{22} = 0$$

$$a_{21} \cdot x_{12} + a_{22} \cdot x_{22} = 1$$

A resolução de C.4, calculando-se os X's, implicará na obtenção da matriz inversa $[S_p^2]^{-1}$.

C.2 - CÁLCULO DOS COEFICIENTES E CONSTANTE DA FUNÇÃO DISCRIMINANTE

Um escore discriminante S, compreendendo um determinado grupo n, é uma equação do tipo:

$$s_n = \lambda_1 \cdot j_i + \lambda_2 \cdot K_i + C \quad (C.5)$$

onde

λ_1 e λ_2 = coeficientes de discriminação correspondentes às variáveis j e K, respectivamente

j_i e K_i = valores observados das variáveis j e K sobre um determinado indivíduo

C = valor constante.

Os coeficientes λ_1 e λ_2 em C.5 são encontrados através de:

$$\lambda_1 = x_{11} \cdot \bar{j} + x_{12} \cdot \bar{k}$$

$$\lambda_2 = x_{21} \cdot \bar{j} + x_{22} \cdot \bar{k}$$

(C.6)

C.4

onde

x_{11} , x_{12} , x_{21} e x_{22} = elementos da matriz $[S_p^2]^{-1}$

\bar{j} e \bar{k} = valores médios das variáveis j e k .

A constante C é obtida por:

$$C = \frac{1}{2} (\lambda_1 \bar{j} + \lambda_2 \bar{k}) \quad (C.7)$$

onde

λ_1 e λ_2 = coeficientes de discriminação obtidas em C.6

\bar{j} e \bar{k} = valores médios das variáveis j e k para um determinado grupo.

C.3 - A FUNÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO

Se o objetivo é classificar um novo indivíduo, caracterizado por medidas j e k , em um dos grupos A e B, o processo é feito basicamente substituindo os valores das variáveis j e k sobre este indivíduo na Equação C.5. Feito isso, a nova observação será alocada para o grupo que apresentar escore mais alto.

O programa DISCRIM, além de fornecer uma matriz de classificação das observações originais utilizadas para a obtenção da função discriminante, fornece também o cálculo das probabilidades de classificação correta destes dados.

Para o caso de dois grupos, a probabilidade de uma observação x ser classificada em A, dado que ela pertence a A, ou ser classificada em B, dado que ela pertence a B, pode ser expressa em termos de variável padrão normal Z como:

$$P(A/A) = P\left(Z < \frac{1}{2} \sqrt{D^2} + \frac{\ln(P_1/P_2)}{\sqrt{D^2}}\right) \quad (C.8)$$

$$P(B/B) = P\left(Z < \frac{1}{2} \sqrt{D^2} + \frac{\ln(P_2/P_1)}{\sqrt{D^2}}\right)$$

onde

D^2 = Distância de Mahalanobis entre as grupos A e B.

Esta observação pode também ser mal classificada, a probabilidade correspondente sendo:

$$P(A/B) = 1 - P(B/B) \quad (C.9)$$

$$P(B/A) = 1 - P(A/A)$$

C.4 - A DISTÂNCIA DE MAHALANOBIS E A CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DE CADA VARIÁVEL NA DISCRIMINAÇÃO DOS GRUPOS

A Distância de Mahalanobis é uma medida de separabilidade entre duas médias multivariadas, expressas em unidades de variância agrupada.

A Distância de Mahalanobis (D^2) entre dois grupos, A e B, é calculada por:

$$D = R_A - R_B \quad (C.10)$$

onde R_A e R_B correspondem a projeção dos centros dos grupos originais A e B ao longo da função discriminante.

Estes índices são calculados, para o caso de duas variáveis e grupo A da seguinte forma:

$$R_A = (\ell_{1Aj} - \ell_{1Bj}) \cdot \bar{j}_A + (\ell_{2Ak} - \ell_{2Bk}) \cdot \bar{k}_A \quad (C.11)$$

onde

ℓ_{1Aj} e ℓ_{1Bj} = coeficientes de discriminação correspondentes à variável j para os grupos A e B, respectivamente.

ℓ_{2Ak} e ℓ_{2Bk} = coeficientes de discriminação correspondentes à variável k para os grupos A e B.

\bar{j}_A e \bar{k}_A = valor médio das variáveis j e k para o grupo A.

Conseqüentemente, para o grupo B tem-se que:

$$R_B = (\ell_{1Aj} - \ell_{1Bj}) \cdot \bar{j}_B + (\ell_{2Ak} - \ell_{2Bk}) \cdot \bar{k}_B$$

O índice discriminante (R_0), o ponto central ao longo da função discriminante que divide ao meio a distância do centro de dois grupos, será igual a:

$$R_0 = \frac{R_A + R_B}{2} \quad (C.12)$$

A contribuição relativa da variável j para a discriminação entre dois grupos pode ser obtida por:

$$E_j = \frac{(\ell_{1Aj} - \ell_{1Bj}) (\bar{j}_A - \bar{j}_B)}{D^2} \quad (C.13)$$

onde

C.7

$\lambda_{1Aj} - \lambda_{1Bj}$ = coeficientes de discriminação correspondentes à variável j para os grupos A e B, respectivamente

\bar{j}_A, \bar{j}_B = valor médio da variável j nos grupos A e B

D^2 = Distância de Mahalanobis entre os grupos A e B.

A contribuição relativa da variável k é obtida com procedimento similar.

APÊNDICE D

CORRELAÇÃO-CRUZADA

Suponha, como exemplo, a existência de duas seqüências de dados de medidas de resistividade elétrica efetivadas em dois poços de perfuração. Suponha também que eles sejam constituídos por uma alternância diversificada de calcários e folhelhos que, associada ao pobre controle estratigráfico da área, torna difícil o processo de correlacionamento estratigráfico entre estes dois poços. O problema resume-se em escolher, dentre as muitas possibilidades, aquela que determine a posição de melhor correlação entre as duas seções. A técnica Correlação-Cruzada pode ser útil na resolução de tais problemas correlacionais, mas seus resultados devem ser interpretados com cuidado (Davis, 1973).

Resumidamente, este processo consiste em obter todas as possíveis comparações entre estas duas seqüências, movendo uma coluna de dados contra a outra. Considere duas séries de dados como y_{1i} e y_{2i} e n^* como o número de pares de observação comparadas entre elas. A Correlação-Cruzada r_m para uma determinada posição de comparação ou emparelhamento m é dada por:

$$r_m = \frac{n^* \sum y_1 \cdot y_2 - \sum y_1 \sum y_2}{\sqrt{[n^* \sum y_1^2 - (\sum y_1)^2] [n^* \sum y_2^2 - (\sum y_2)^2]}} \quad (D.1)$$

As posições de emparelhamento são numeradas seqüencialmente e plotadas contra os dados de correlação-cruzada r_m , originando gráficos denominados correlogramas-cruzados.

A significância do coeficiente de correlação-cruzada pode ser avaliada pelo teste aproximado:

D.2

$$T = r_m \sqrt{\frac{n^* - 2}{1 - r_m^2}} \quad (D.2)$$

Com $(n^* - 2)$ graus de liberdade.

Este teste é derivado de um teste para a significância das correlações entre duas amostras extraídas de população normal (Davis, 1973).