



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO GEOFÍSICA DO SISTEMA Aqüífero  
NA ÁREA DO PARQUE DAS LAGOAS E DUNAS  
DO ABAETÉ

JANDER WELTON OLIVEIRA DE MORAES

SALVADOR – BAHIA

AGOSTO – 1997

**AVALIAÇÃO GEOFÍSICA DO SISTEMA AQÜÍFERO NA ÁREA DO  
PARQUE DAS LAGOAS E DUNAS DO ABAETÉ**

por

**JANDER WELTON OLIVEIRA DE MORAES**

**GEO 213 - TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA**

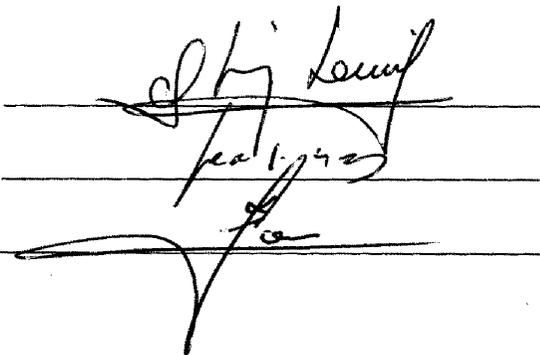
**DO**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**DA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

Comissão Examinadora

Three handwritten signatures are written over three horizontal lines. The top signature is the most legible, appearing to read 'Olivar Lima'. The middle signature is less legible, possibly 'Geraldo da Silva'. The bottom signature is very stylized and difficult to decipher.

Dr. Olivar Antônio Lima de Lima - Orientador

Dr. Geraldo da Silva Vilas Boas

Dr. Milton José Porsani

Data da aprovação: 26 de agosto de 1997

Para meus familiares, em especial  
aos meus pais, pela paciência e  
apoio incondicional nesta longa  
jornada, sem os quais nada seria  
possível.

Para Karla, luz de meu viver.

*A maior fonte de poluição é a ignorância.*

Alberto Brum Novaes

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> . . . . .	i
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> . . . . .	iii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> . . . . .	iv
<b>CAPÍTULO 1</b> <b>Introdução</b> . . . . .	1
<b>CAPÍTULO 2</b> <b>Aspectos Geológicos</b> . . . . .	3
2.1 Geologia Regional . . . . .	3
2.2 Fisiografia . . . . .	4
2.3 Geologia Local . . . . .	4
2.4 Evolução Quaternária Paleogeográfica . . . . .	7
2.5 Limnologia da Lagoa do Abaeté . . . . .	11
2.5.1 Morfometria . . . . .	11
2.5.2 Características Físico-Químicas e Qualidade da Água . . . . .	13
2.6 Hidrogeologia . . . . .	13
<b>CAPÍTULO 3</b> <b>Aspectos Teóricos das Técnicas Geofísicas</b> . . . . .	17
3.1 Radar de Penetração no Solo . . . . .	17
3.2 Eletrorresistividade e Polarização Induzida . . . . .	21
3.2.1 Eletrorresistividade . . . . .	21
3.2.2 Polarização Induzida . . . . .	23
3.3 Magnetometria . . . . .	24
<b>CAPÍTULO 4</b> <b>Aquisição e Processamento dos Dados Geofísicos</b> . . . . .	29
4.1 Radar de Penetração no Solo . . . . .	29
4.1.1 Técnicas de Aquisição e Processamento . . . . .	29
4.1.2 Aquisição e Processamento de Famílias de Tiro-Comum - Morro do Mirante . . . . .	32
4.1.3 Aquisição e Processamento de Famílias de Tiro-Comum - Hotel Sofitel . . . . .	44
4.1.4 Aquisição e Processamento de Seções de Afastamento Constante . . . . .	46
4.2 Eletrorresistividade e Polarização Induzida . . . . .	49

4.2.1	Aquisição e Processamento - Eletrorresistividade . . . . .	49
4.2.2	Aquisição e Processamento - Polarização Induzida . . . . .	53
4.3	Magnetometria . . . . .	53
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Análise dos Levantamentos Geofísicos . . . . .</b>	<b>56</b>
5.1	Radar de Penetração no Solo . . . . .	56
5.1.1	Análise dos Resultados do Processamento de Famílias de Ponto-Médio Comum Obtidas a Partir de Famílias de Tiro-Comum . . . . .	56
5.1.2	Análise das Seções com Afastamento Constante . . . . .	67
5.2	Análise das Sondagens Elétricas e Pseudo-Seções de Resistividade e Polari- zação Induzida . . . . .	86
5.3	Magnetometria . . . . .	89
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>Conclusões e Recomendações . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>AGRADECIMENTOS . . . . .</b>	<b>98</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>105</b>
A.1	Famílias de tiro-comum - morro do Mirante . . . . .	106
A.2	Famílias de tiro-comum - Hotel Sofitel . . . . .	107
A.3	Programas para o Processamento de Famílias de Tiro-Comum . . . . .	108
A.3.1	Concatenação dos Tiros . . . . .	108
A.3.2	Análise de Velocidades por Correção de Sobretempo Normal . . . . .	109
A.3.3	Análise de Velocidades por Correção de Sobretempo Normal e Empi- lhamento de um Conjunto de Famílias de Ponto-Médio Comum . . . . .	111
A.3.4	Análise de Velocidades por <i>Semblance</i> . . . . .	113
A.3.5	Conversão de Velocidades de Empilhamento para Velocidades Interva- lares . . . . .	115

# ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Parâmetros morfométricos gerais da Lagoa do Abaeté (modificado de CETREL, 1992) . . . . .	11
3.1	Propriedades elétricas de alguns materiais geológicos à 100MHz. (Davis and Annan,1989) . . . . .	21

# ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Mapa de localização e esboço geológico, destacando a área de estudo em vermelho (modificado de Guimarães, 1978). . . . .	5
2.2	Esquema da evolução quaternária paleogeográfica da costa atlântica do Estado da Bahia, demonstrando os principais eventos (modificado de Dominguez <i>et alii</i> , 1981) . . . . .	9
2.3	Corte esquemático da linha de costa, detalhando a seqüência deposicional dos sedimentos quaternários. Tb- Grupo Barreiras, Q1a- depósitos de leques aluviais coalescentes, Qe1- dunas continentais internas, Qt1- terraços marinhos pleistocênicos, Qe2- dunas continentais externas, Qt2- terraços marinhos holocênicos, Qe3- dunas litorâneas atuais (modificado de Martin <i>et alii</i> , 1980c)	10
2.4	Mapa batimétrico da Lagoa do Abaeté, com cotas expressas em metros (modificado de CETREL, 1992) . . . . .	12
2.5	Monitoramento da condutividade (acima), pH (centro) e temperatura (abaixo) para a Lagoa do Abaeté, num ciclo de 24 horas (modificado de CETREL, 1992).	14
3.1	Espectro de resistividades para alguns materiais geológicos (modificado de Sumner, 1976). . . . .	22
3.2	Modelo esquemático do efeito de polarização de membrana (acima) e circuito elétrico simplificado para sua modelagem. Em (a), situação de repouso, demonstrando a polarização natural devido a cargas negativas desbalanceadas do grão de argila. Em (b), efeito de bloqueio da passagem de corrente, por obstrução da passagem dos anions (modificado de Sumner, 1976). . . . .	25
3.3	Relações geométricas entre as componentes do campo geomagnético. . . . .	27
4.1	Foto com vista parcial da área, indicando a linha 1 com levantamento <i>shot-gather</i> . . . . .	32
4.2	Resultado da análise de velocidades empregando a técnica de <i>NMO</i> em um único <i>CMP</i> (posição 500), para velocidades entre 0,08 m/ns e 0,18 m/ns. Os eventos mais perfeitamente horizontalizados representam os pares ( <i>t, v</i> ) corretos.	35

4.3	Resultado da análise de velocidades empregando a técnica de <i>NMO</i> com empilhamento, para os <i>CMP</i> 's entre 450 e 550, com velocidades variando entre 0,08 m/ns e 0,18 m/ns. Os melhores pares $(t, v)$ são aqueles mais "acessos" (maior energia de empilhamento). . . . .	37
4.4	Família <i>CMP</i> com <i>mute</i> e a análise de velocidades correspondente, para a posição 500. . . . .	39
4.5	Velocidades intervalares para o trecho entre 200 e 1200 cm (referência no primeiro tiro), obtido a partir de velans espaçados de 100 cm . . . . .	42
4.6	Radargrama empilhado para um modelo de velocidades lateralmente constantes, no trecho entre 200 e 1200 cm. Vide explicações no texto . . . . .	43
4.7	Acima, foto com vista parcial do campo de golfe e abaixo, a linha de levantamentos <i>WARRs</i> , próxima à sondagem elétrica vertical 04. . . . .	44
4.8	Família <i>CMP</i> com <i>mute</i> e ganho e a análise de velocidades correspondente, para a posição 500. . . . .	45
4.9	Perfil 284. Na parte superior, na seção em tempo, nota-se a estrutura de "gravata borboleta", causada por um foco enterrado. Abaixo, a seção migrada para profundidade, com correção topográfica simultânea (Botelho & Pestana, 1996). . . . .	48
4.10	Modos mais usuais de arranjos de eletrodos para sondagens/perfilagens em superfície. (i) Schlumberger, (ii) Wenner, (iii) dipolo-dipolo, (iv) dipolo-polo. . . . .	50
4.11	Acima, inversão unidimensional da SEV01 com o auxílio de curvas especiais (método do ponto auxiliar). Abaixo, o resultado do refinamento utilizando o programa <i>RESIS 1.0</i> . . . . .	52
5.1	Famílias <i>CMP</i> com <i>mute</i> e a análise de velocidades correspondente, para as posições 300 (acima) e 400 (abaixo). . . . .	58
5.2	Famílias <i>CMP</i> com <i>mute</i> e a análise de velocidades correspondente, para as posições 600 (acima) e 700 (abaixo). . . . .	59
5.3	Famílias <i>CMP</i> com <i>mute</i> e a análise de velocidades correspondente, para as posições 800 (acima) e 900 (abaixo). . . . .	60
5.4	Famílias <i>CMP</i> com <i>mute</i> e a análise de velocidades correspondente, para as posições 1000 (acima) e 1100 (abaixo). . . . .	61
5.5	Constantes dielétricas calculadas a partir das velocidades intervalares da figura 4.5. . . . .	62
5.6	Famílias <i>CMP</i> com <i>mute</i> e ganhos e a análise de velocidades correspondente, para as posições 300 (acima) e 400 (abaixo). . . . .	64

5.7	Famílias <i>CMP</i> com <i>mute</i> e ganho e a análise de velocidades correspondente, para as posições 600 (acima) e 700 (abaixo). . . . .	65
5.8	Famílias <i>CMP</i> com <i>mute</i> e ganho, e a análise de velocidades correspondente, para as posições 800 (acima) e 900 (abaixo). . . . .	66
5.9	Perspectiva da Lagoa do Abaeté e seu anfiteatro de dunas, revelando regiões circunvizinhas mais baixas que o nível de seu espelho d'água. Essa informação mostra que o morro do Mirante deve conter um nível impermeável em seu interior. . . . .	68
5.10	Localização dos radargramas adquiridos no morro do Mirante e morro do Vigia.	69
5.11	Radargramas transversais à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Percebe-se claramente a presença de um foco enterrado nos perfís 284 e 286, acusados pela imagem de “gravata borboleta”. . . . .	70
5.12	Radargramas migrados transversais à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Migração por diferenças finitas com correção topográfica simultânea (Botelho & Pestana, 1996). Em vermelho, topo do embasamento ou manto de alteração (?); em amarelo, horizonte interno do corpo de areia e em azul, nível estático . . . . .	71
5.13	Radargrama migrado longitudinal à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Migração utilizando o algoritmo <i>split-step</i> (Freire, 1986). Em vermelho, embasamento ou manto de alteração (?); em amarelo, horizontes internos do corpo de areia e em azul, zona saturada. Notar a falsa impressão de “descida” do nível freático, por efeito não compensado da ascensão topográfica. . . . .	72
5.14	Perfís de radar executados no flanco sul-sudoeste da Lagoa do Abaeté (vide canto inferior esquerdo), demonstrando três níveis: (i)embasamento ou manto de alteração (?); (ii)corpo arenoso saturado, com estratificações internas e (iii)zona não saturada. Radargramas migrados com o algoritmo <i>split-step</i> , sem correção topográfica. . . . .	74
5.15	Radargramas migrados transversais à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Migração com o algoritmo <i>split-step</i> (perfil 31) e por diferenças finitas (perfil 298) com correção topográfica simultânea (Botelho & Pestana, 1996). Em vermelho, topo do embasamento ou manto de alteração (?); em amarelo, horizonte interno do corpo de areia, superfície topográfica atual e paleofrentes de duna; em azul, nível estático. . . . .	76

5.16	Composição dos radargramas 30 e 31, em tempo, demonstrando claramente o topo do freático (azul), paleofrentes de dunas e outras estruturas no corpo arenoso (amarelo) e um horizonte mais profundo, na porção sul (início do perfil), o qual pode representar o topo do embasamento ou seu manto de alteração. Percebe-se o efeito reverso da topografia sobre os refletores, aparentando uma subida do nível estático na faixa de descida da frente de duna (confrontar com a figura 5.15). . . . .	77
5.17	Perfis de radar executados no morro do Vigia, em posição aproximadamente perpendicular aos radargramas 279 e 30-31. Nota-se a persistência do refletor abaixo do nível estático também nestes perfis e algumas estruturas internas do corpo arenoso. Há também indícios de um refletor mais profundo, provavelmente o embasamento cristalino ou seu manto de alteração (em vermelho).	78
5.18	Seção 279, adquirida no topo do morro do Vigia e paralelamente aos radargramas 30-31. Em destaque o nível freático (azul), algumas estruturas no corpo arenoso (mega-estratificações cruzadas) e uma possível interface com o embasamento cristalino ou seu manto de alteração. Nota-se dois eventos (“A” e “B”) suspeitadamente advindos de reflexões laterais. Entretanto, apenas o evento assinalado com a letra “B” pode ser confirmado como reflexão espúria lateral, como pode ser demonstrado com a migração. . . . .	79
5.19	Planta baixa das dependências do Hotel Sofitel e localização dos levantamentos geofísicos . . . . .	81
5.20	Rãdargrama 600, adquirido com antenas de 32MHz. Pode-se perceber o refletor mais profundo suavemente ondulado (embasamento, manto de alteração ou nível de aterro ?), com mergulho baixo para norte. O uso desta frequência mais baixa diminui a resolução dos refletores mais rasos, dificultando a identificação do nível freático, que se encontra subaflorante no local. . . . .	82
5.21	Radargrama 456-458 migrado com velocidades variáveis (método <i>split-step</i> ), adquirido com antenas de 80MHz e pseudo-seção de resistividade elétrica (vide 4.2), com inversão das resistividades considerando modelos unidimensionais para cada sondagem. Salienta-se, ainda, que os resultados das inversões unidimensionais foram truncados na composição com a imagem de radar, considerando a máxima profundidade de migração . . . . .	83
5.22	Linha 455, adquirido com antenas de 80MHz. Nota-se ao menos três níveis característicos, com o freático sub-aflorante na porção central. Acima, seção em tempo e abaixo, migração com velocidade constante ( <i>phase-shift</i> ). . . . .	84

5.23	Radargrama 34. Nota-se o efeito da ascensão da topografia na falsa impressão de descida no nível freático. Percebe-se, ainda, o efeito absorvivo da camada argilosa que compõem um pequeno trecho de aterro, no início do perfil. . . .	85
5.24	Sondagens elétricas conduzidas na área entre a Lagoa do Abaeté e a praia de Itapoan. Os sufixos “a”, “b”, “c” e “d” indicam os afastamentos dos eletrodos de potencial em 0,50 m, 1 m, 5 m e 20 m, respectivamente. . . . .	87
5.25	Interpretação geológica da pseudo-seção de eletrorresistividade/IP e radargrama correlato. . . . .	88
5.26	Sondagens elétricas verticais adquiridas na area do Hotel Sofitel, com resultados das inversões unidimensionais e indicação do erro quadrático médio. Da esquerda acima para a direita abaixo, SEV05, SEV04, SEV03 e SEV02. . . .	89
5.27	Sondagens elétricas verticais adquiridas na area do Hotel Sofitel, com resultados das inversões unidimensionais e indicação do erro quadrático médio. De cima para baixo: SEV06, SEV07 e SEV08. Observa-se que o crescimento da resistividade na porção final da curva da SEV08 se dá com um coeficiente angular maior que 1 (45°) na escala log X log, o que ultrapassa o limite de validade para casos unidimensionais. . . . .	91
5.28	Pseudo-seção de resistividade aparente e polarização induzida adquirida no Hotel Sofitel. Observa-se um “baixo” de resistividade na porção norte (início), associado com uma anomalia positiva de <i>IP</i> . Isso pode ser um indicativo de areias argilosas, com água doce. Na porção sul, percebe-se um “alto” de resistividade, com valores médios de polarização. Trata-se provavelmente do embasamento fraturado mais raso. . . . .	92
5.29	Mapa magnético do Abaeté, com mensuração da componente vertical do campo. Nota-se uma assimetria clara entre a porção norte (morro do Mirante) e a porção sul (morro do Vigia). . . . .	93
6.1	Resultado final da interpretação hidrogeológica dos levantamentos geofísicos.	96

# CAPÍTULO 1

## Introdução

A região que hoje engloba o Parque das Lagoas e Dunas do Abaeté tem sido estudada, ao menos indiretamente, desde a década de 60 (Sestini, 1961). Em 1971, Bittencourt realizou sua dissertação de mestrado conduzindo um estudo detalhado da sedimentação recente (quaternária) na costa atlântica de Salvador, inclusive com diversas amostragens na região de Itapoan. A este trabalho, seguiu-se o de Guimarães (1978), contando com um maior detalhamento no campo de dunas e algumas datações radiométricas com base no método do carbono-14.

Em 1980 é publicado pela Coordenação da Produção Mineral, órgão da Secretaria das Minas e Energia do Governo do Estado, o Mapa Geológico do Quaternário Costeiro do Estado da Bahia e seu texto explicativo (Martin *et alii*, 1980c). Este documento sintetiza os diversos trabalhos conduzidos até então, principalmente os de Bittencourt *et alii* (1978; 1979a,b), Martin *et alii* (1979a,b; 1980a,b) e Vilas Boas *et alii* (1979; 1980). Trata-se da referência mais significativa para os estudos conduzidos sobre a região litorânea.

A Lagoa do Abaeté constitui um dos mais belos cenários naturais de nossa cidade, com um grande valor turístico. O ecossistema local é de uma riqueza impressionante e também extremamente frágil, no qual o aspecto hidrogeológico assume uma importância ímpar.

O fenômeno de ocupação desordenada e constante depredação ambiental da região em torno da Lagoa do Abaeté mobilizou, a partir do ano de 1985, o Instituto de Geociências a conduzir estudos específicos sobre este micro-ecossistema. O trabalho de Avanzo (1988) sintetiza uma série de documentos específicos sobre o Abaeté, tecendo considerações geológicas/hidrogeológicas e propondo um esquema de gênese e evolução do Abaeté, além de compor um histórico dos eventos de impacto ambiental e um diagnóstico hierarquizado dos elementos impactantes.

Finalmente, em 1992, a Secretaria do Planejamento, Ciência e Tecnologia do Governo do Estado contratou a CETREL S/A para conduzir um diagnóstico ambiental detalhado da

área, com objetivo de implantação do atual Parque das Lagoas e Dunas do Abaeté. O relatório final detalha os aspectos limnológicos da Lagoa do Abaeté e Abaeté-Catu, concluindo pelo elevado grau de eutrofização por interferência antrópica, na primeira. O processo de eutrofização consiste no aumento da biomassa, diminuição do oxigênio dissolvido na água, podendo mesmo resultar no completo desaparecimento do lago.

O presente trabalho tem como enfoque principal a caracterização detalhada dos aspectos hidrogeológicos da região de dunas costeiras e terraços marinhos da costa nordeste do Estado da Bahia, no âmbito do Parque das Lagoas e Dunas do Abaeté, utilizando o ferramental geofísico. Pretende-se demonstrar a eficiência e importância dos métodos geofísicos na caracterização geológico-estrutural da subsuperfície, em apoio ao levantamento geológico de superfície e posterior campanha de sondagens com fins estratigráficos e/ou de instalação de piezômetros.

## CAPÍTULO 2

# Aspectos Geológicos

### 2.1 Geologia Regional

A região que engloba a área de estudo apresenta dois grandes domínios geológicos. A oeste ocorrem as rochas cretáceas da Bacia Sedimentar do Recôncavo-Tucano, em uma estrutura de *rift* seguindo um alinhamento aproximado N-S. A leste, limitando a Bacia por um conjunto de falhas extensas e sub-verticais (dentre as quais está a Falha de Salvador), surge o cinturão Salvador-Esplanada, com rochas cristalinas arqueanas. Este último engloba totalmente a área em estudo.

O cinturão Salvador-Esplanada é composto por rochas de alto grau metamórfico (granulitos, anfibolitos e gnaisses). Em termos estruturais, pode-se dividir o cinturão em três faixas sub-paralelas, de orientação geral coincidente com a da linha de costa (Sabaté, 1996): (i) terrenos granulíticos na margem costeira de Salvador (Fujimori, 1968); (ii) terrenos gnaissicos, migmatíticos e granitóides nas regiões mais internas e (iii) terrenos na *fácies* xisto-verde, intercalados entre as duas anteriores e ocorrendo subordinadamente (Oliveira, 1990). A deformação principal é controlada por uma zona de cisalhamento, chamada Aporá-Itamira, a qual imprime bandamentos com mergulhos acentuados para leste e registros de transcorrência sinistral.

Recobrando as rochas do embasamento cristalino que formam o cinturão Salvador-Esplanada, ocorrem sedimentos terciário-quadernários com uma extensão superficial bastante considerável.

O Grupo Barreiras e suas respectivas Formação Guararapes e Formação Riacho Morno (Bigarella & Andrade, 1964) representa a quase totalidade do Terciário no Estado (Vilas Boas, 1996). A divisão entre as duas formações é marcada por uma discordância erosiva e as duas formações são correlacionadas a dois eventos de pediplanação (Bigarella, 1975). Basicamente, são compostas por areias finas a grossas, com cores variegadas, ferruginosas em geral, pobremente selecionados e friáveis. Ocorrem sob a forma de tabuleiros com pequena

inclinação no sentido da costa.

Depósitos quaternários legam um excelente registro da evolução paleoclimática e respectivas oscilações do nível do mar. Eles se subdividem, na região costeira, em terraços marinhos pleistocênicos, terraços marinhos holocênicos, leques aluviais coalescentes, dunas costeiras, depósitos de pântanos e mangues atuais e depósitos fluviolagunares (Bittencourt, 1996).

## 2.2 Fisiografia

O alvo de estudo está inserido no Setor I e próximo à zona de fronteira com o Setor II da costa do Estado da Bahia (Martin *et alii*, 1980c). O setor I, na área, é caracterizado pela presença de um extenso campo de dunas inativas, configurando um padrão de revelo bastante distinto daquele encontrado com os solos desenvolvidos sobre o embasamento cristalino. A rede de drenagens é extremamente escassa e irregular, devido a alta permeabilidade das areias de dunas. O processo de instalação das dunas inclusive mostra evidências de ter desviado os cursos dos rios, pelo menos no trecho entre Itapoan e Lauro de Freitas (Avanzo, 1988).

A vegetação arbustiva, de pequeno a médio porte, juntamente com a vegetação rasteira, são de destacada importância na estabilização do campo de dunas. Segundo Noblick<sup>1</sup>, a vegetação das dunas aparenta ter sofrido um isolamento por um período longo, o que explicaria determinados endemismos. Estes dois fatos por si só traduzem a importância desta flora na manutenção do equilíbrio deste ecossistema.

## 2.3 Geologia Local

De modo grosseiro, podemos dividir o local de estudo em quatro grandes compartimentos: (i) rochas cristalinas do embasamento, sãs ou fraturadas e (ii) seu manto de alteração; (iii) níveis areno-argilosos fluviolagunares e (iv) os corpos arenosos.

A área estudada (figura 2.1), que engloba os arredores da Lagoa do Abaeté e dependências do Hotel Sofitel, é dominada em superfície pelos depósitos quaternários. Apenas na linha de praia pode-se encontrar afloramentos de rochas pouco alteradas do embasamento cristalino. O Grupo Barreiras não é notado em afloramentos nesta área.

Guimarães (1978), em sua tese de mestrado, mapeou a região costeira de Salvador no trecho que engloba a área em estudo, na escala de 1:25.000. Esse mapa foi utilizado como

---

<sup>1</sup>in “Diagnóstico Ambiental do Abaeté”, CETREL, 1992

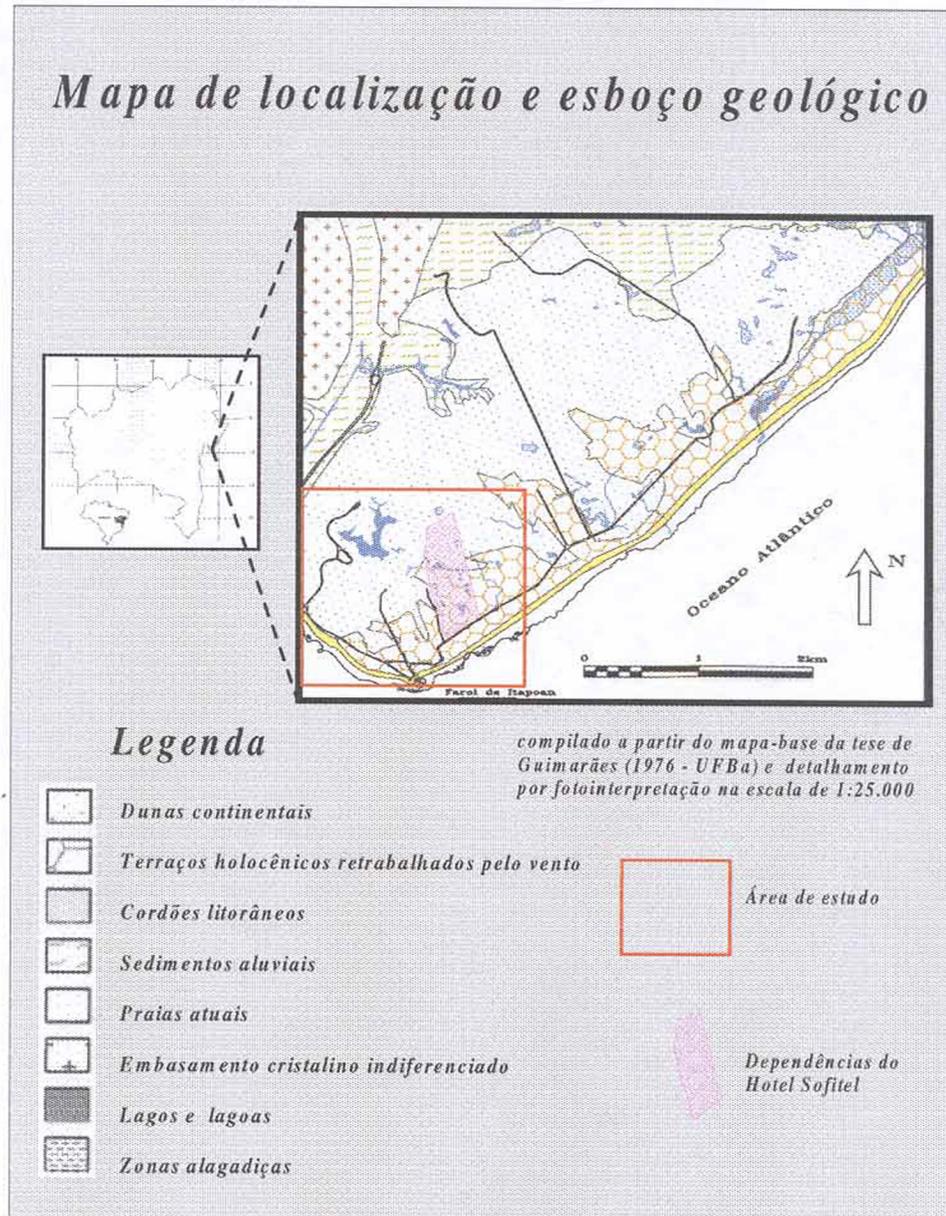


Figura 2.1: Mapa de localização e esboço geológico, destacando a área de estudo em vermelho (modificado de Guimarães, 1978).

base de cartografia geológica para o presente trabalho.

O detalhamento dos corpos arenosos quaternários revela uma estruturação bem hierarquizada, a qual registra o comportamento paleoclimático e paleofisiográfico. Detalhando os mesmos em uma escala mais abrangente, temos (Bittencourt, 1996):

- Leques Aluviais Coalescentes

São depósitos arenosos grosseiros, mal selecionados, de coloração branca e contendo seixos arredondados a angulosos. Tem ocorrência associada ao sopé de elevações, com topos situados entre 15 e 20 metros acima do NMM atual. A fonte de sedimentos tanto pode ser de rochas cretáceas como pré-cambrianas, com suas características texturais dependentes destas fontes.

- Terraços Marinheiros Pleistocênicos

Esses terraços tem sua origem creditada ao final da Penúltima Transgressão e à regressão subsequente. São compostos por areias de coloração branca na superfície gradando para marrom e preta, em média 2m abaixo. Contém tubos fósseis de *Ophiomorfa*, que atestam uma origem marinha. Na região, ocorrem de maneira muito restrita e não foram individualizados na área de estudo.

- Terraços Marinheiros Holocênicos

Ocorrem na parte externa dos terraços marinheiros pleistocênicos, em uma cota mais baixa. Se destacam destes últimos por serem mais finos, com estruturas sedimentares perfeitamente conservadas. Normalmente contém restos de conchas e tubos fósseis de *Ophiomorfa*. O topo destes terraços está entre alguns centímetros até mais de 4m acima do nível atual da preamar. Novamente, são escassos na parte norte de Salvador. O retrabalhamento desses terraços pelo vento conferiu à área de estudo um pequeno campo de dunas litorâneas, mapeadas por Guimarães (1978) como “terraços marinheiros holocênicos retrabalhados pelo vento”.

- Campo de Dunas

Ocorrem desde Salvador até o extremo nordeste do Estado, e são divididas em três gerações, com base principalmente nas características morfoscópias de suas areias (Martin *et alii*, 1980c) e nas relações de contato com outras unidades quaternárias. São elas:

Dunas Internas - ocupam uma maior área. As areias apresentam uma predominância de grãos angulosos (80%), o que confere uma total distinção dos terraços

marinhos e praias atuais. Acredita-se que estas areias sejam de fonte continental. Pelas relações de contato, pode-se assegurar que o limite superior de idade destas dunas é anterior à formação dos terraços pleistocênicos.

Dunas Externas - situam-se entre as dunas internas e a linha de praia, apresentando características morfoscópicas distintas destas últimas. Pela análise do grau de arredondamento, percebe-se uma proximidade textural destas dunas com os terraços pleistocênicos, o que advoga uma origem pelo retrabalhamento eólico destes depósitos. O limite superior de idade das dunas externas está vinculado ao último máximo transgressivo.

## 2.4 Evolução Quaternária Paleogeográfica

Os diversos depósitos anteriormente descritos fornecem um conjunto de testemunhos importantes acerca da evolução paleogeográfica e paleoclimática da costa atlântica do Estado da Bahia. Pode-se esquematizar 6 eventos mais importantes, a partir do máximo da Transgressão Mais Antiga (Bittencourt, 1996), conforme as figuras 2.2 e 2.3:

- Evento I

No Pleistoceno, ocorreu o que se denomina por “Transgressão Mais Antiga”, na qual o Grupo Barreiras foi erodido. Esse processo erosivo remontante construiu uma linha de falésias ao mesmo tempo em que o mar afogou os baixos cursos dos rios, construindo estuários. O registro desta falésia é visível apenas na região de Itacimirim (ao norte de Salvador), pois a transgressão marinha subsequente retrabalhou o restante desta feição geomorfológica.

- Evento II

O processo regressivo posterior a Transgressão Mais Antiga foi acompanhado por uma forte mudança climática. O clima tornou-se semi-árido, com chuvas esparsas e violentas, o que resultou na geração dos leques aluviais coalescentes no sopé das falésias pré-esculpidas anteriormente. Neste momento, a ação eólica sobre a superfície destes depósitos teria construído o campo de dunas internas.

- Evento III

É marcado pelo máximo da Penúltima Transgressão (120.000 anos). Neste período transgressivo o mar erodiu os leques aluviais coalescentes, restando apenas alguns testemunhos isolados no sopé do Grupo Barreiras. Grande parte das falésias foram

também retrabalhadas e novamente o mar afogou o baixo curso dos rios da região, transformando-os em estuários.

- Evento IV

A regressão que se verificou após o Evento III permitiu a construção dos terraços marinhos pleistocênicos, tendo como fonte de sedimento as falésias do Grupo Barreiras e os remanescentes dos leques aluviais. Instalou-se também sobre estes terraços uma rede de drenagens, devido ao rebaixamento do nível de base. A ação dos ventos sobre estes terraços teria ocasionado a construção do campo de dunas externas, em certos locais.

- Evento V

A última Transgressão, com máximo em aproximadamente 5.100 anos B.P., ocasionou a erosão parcial dos terraços marinhos pleistocênicos e, em alguns lugares, chegou a atingir novamente as falésias do grupo Barreiras. Ainda durante este evento, os rios foram novamente afogados e apareceram uma série de lagunas na região costeira. Estas construções se deram ou a partir dos vales entalhados no Grupo Barreiras e da rede de drenagem sobre os depósitos pleistocênicos ou pela formação de ilhas-barreiras, as quais atuaram como diques externos para os corpos lagunares.

- Evento VI

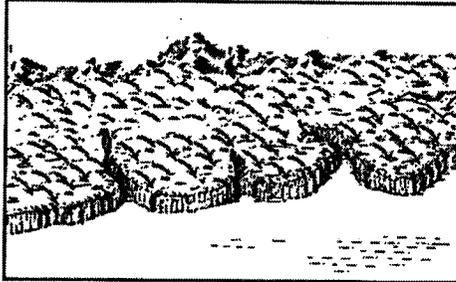
O processo regressivo posterior ao Evento V modelou a costa para sua atual configuração. Nesta etapa, foram construídos os terraços marinhos holocênicos ( $\simeq$  2.000 anos), externamente em relação aos terraços pleistocênicos. As lagunas perderam sua comunicação com o mar, transformando-se em pântanos e uma terceira geração de dunas, ainda quase totalmente móveis, desenvolveu-se ao longo do litoral norte de Salvador.

Especificamente em relação à gênese da Lagoa do Abaeté, a hipótese mais conhecida e única publicada provém de Avanzo (1988). Nesta hipótese, são propostas cinco fases para explicar o seu surgimento a partir de um antigo rio (“Rio Abaeté”), engendradas entre dois períodos regressivos intercalados por uma transgressão marinha.

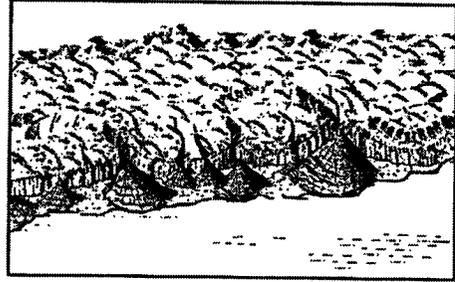
Neste intervalo, ocorreria um rejuvenescimento do “Rio Abaeté” e a migração de seu leito progressivamente de SE para SW por interferência de corpos de dunas. No penúltimo estágio, haveria o completo barramento de seu curso pelas dunas e fixação das mesmas, devido ao desenvolvimento de uma maior cobertura vegetal em resposta a mudança do clima semi-árido para um clima mais ameno. O último estágio seria marcado por uma pequena regressão e pelo acréscimo de volume da Lagoa do Abaeté.

### ***Evolução Paleogeográfica Quaternária da Costa Atlântica da Bahia***

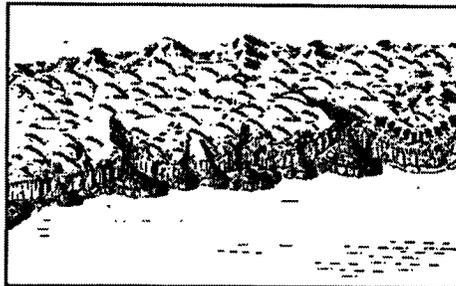
**Evento I - Transgressão Mais Antiga**



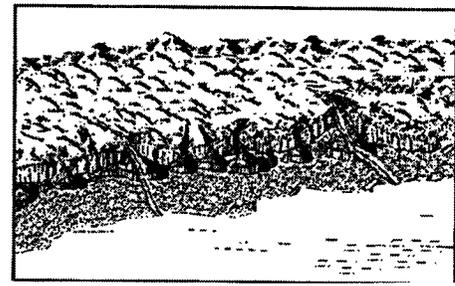
**Evento II - Leques Aluviais Pleistocênicos**



**Evento III - Máximo da Penúltima Transgressão**



**Evento IV - Planície Costeira Pleistocênica**



**Evento V - Máximo da Última Transgressão**



**Evento VI - Planície Costeira Holocênica**



Figura 2.2: Esquema da evolução quaternária paleogeográfica da costa atlântica do Estado da Bahia, demonstrando os principais eventos (modificado de Dominguez *et alii*, 1981)

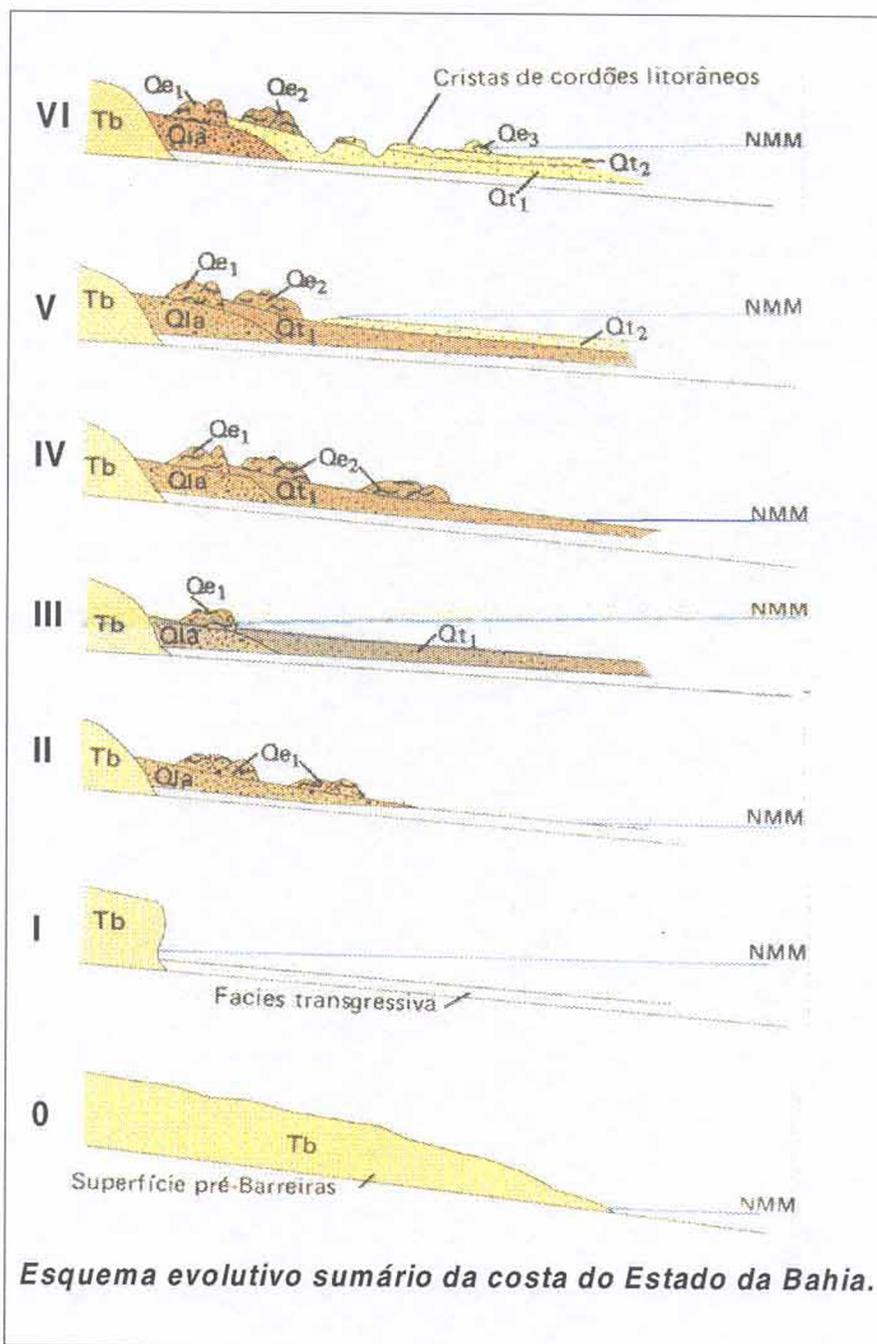


Figura 2.3: Corte esquemático da linha de costa, detalhando a seqüência deposicional dos sedimentos quaternários. Tb- Grupo Barreiras, Qla- depósitos de leques aluviais coalescentes, Qe1- dunas continentais internas, Qt1- terraços marinhos pleistocênicos, Qe2- dunas continentais externas, Qt2- terraços marinhos holocênicos, Qe3- dunas litorâneas atuais (modificado de Martin *et alii*, 1980c)

Uma questão geológica pode ser citada como merecedora de um maior aprofundamento. Ela advém da observação do mapa obtido por Guimarães (1978), na região em torno da Lagoa do Abaeté. Nele, o flanco sudoeste das dunas que margeiam a Lagoa aparecem mapeados como equivalentes às dunas externas, enquanto os demais corpos de areia são mapeados como dunas internas. Este resultado foi incorporado ao Mapa Geológico do Quaternário Costeiro do Estado da Bahia. Caso esta informação seja confirmada na escala de detalhe exigida para este estudo, teremos que adicionar à proposta de Avanço mais um ciclo de transgressão e regressão marinhas para acomodar essas duas gerações de dunas. Assim, a Lagoa teria sido originada provavelmente antes ou, no máximo, durante o Evento IV (regressão posterior à Penúltima Transgressão). Se esta informação estiver incorreta e todas as dunas forem pleistocênicas, ainda assim é necessário incluir à hipótese mais um ciclo transgressivo/regressivo na gênese da Lagoa.

## 2.5 Limnologia da Lagoa do Abaeté

### 2.5.1 Morfometria

Segundo CETREL (1992), a Lagoa do Abaeté caracteriza um lago (e não uma lagoa) pequeno, de forma amebóide e que, segundo o critério de Hutchinson<sup>2</sup>, classifica-se como lago de dunas. A campanha batimétrica conduzida pela CETREL demonstra que o Abaeté é um lago raso, sujeito a oscilações consideráveis na altura de seu espelho d'água em função de variações sazonais de pluviosidade. Os dados morfométricos estão listados na tabela 2.1

Parâmetros morfométricos	Valor
Área	16.185m <sup>2</sup>
Volume	18.744m <sup>3</sup>
Profundidade máxima	5,0m
Profundidade média	1,158m
Perímetro	2270m

Tabela 2.1: Parâmetros morfométricos gerais da Lagoa do Abaeté (modificado de CETREL, 1992)

O mapa batimétrico pode ser visto na figura 2.4

---

<sup>2</sup>in CETREL, 1992

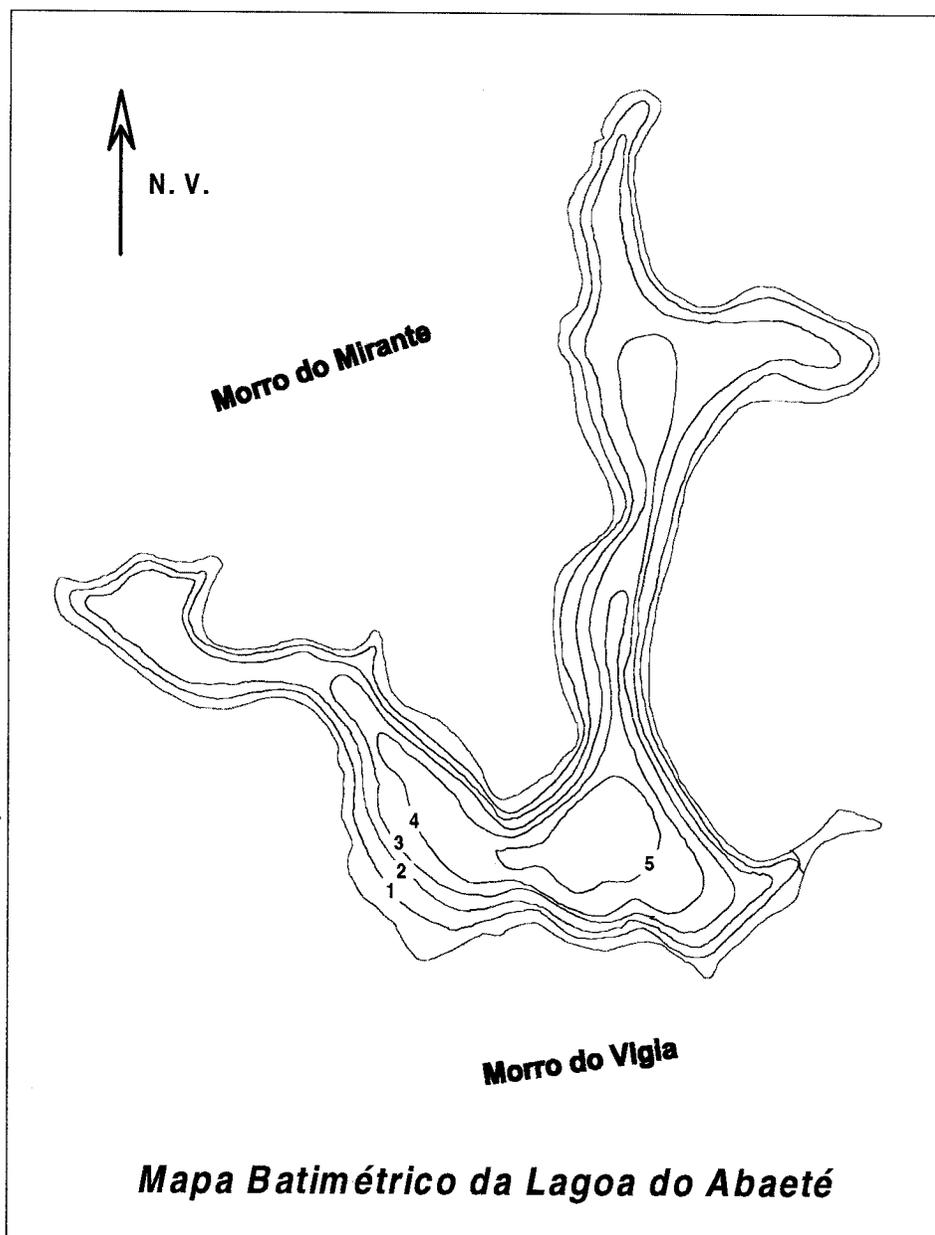


Figura 2.4: Mapa batimétrico da Lagoa do Abaeté, com cotas expressas em metros (modificado de CETREL, 1992)

### 2.5.2 Características Físico-Químicas e Qualidade da Água

As águas da Lagoa do Abaeté são escuras, devido a presença de compostos húmicos, apresentando-se com pH ácido na região do hipolimnion (zona de fundo) e básico a neutro na região do epilimnion (zona superficial).

Determinações de temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade e pH foram conduzidas pela CETREL ao longo da coluna d'água da Lagoa do Abaeté e Lagoa de Abaeté-Catu (ou Lagoa de Iemanjá, conforme denominação do CONDER), durante um período de 24 hora (figura 2.5). Destaca-se a estrutura térmica dessas Lagoas, que permitem uma classificação como lagos oligomíticos. Neste caso, apresentam uma estruturação térmica definida, distinguindo perfeitamente o epilimnion e o hipolimnion. Os valores de condutividade elétrica para a Lagoa do Abaeté mostram uma oscilação entre 13,9 e 17mS/m, equivalentes a resistividades variando entre 71,9 e 58,8 $\Omega$ m. A concentração de cloretos é marcantemente alta no Abaeté, quando comparada com outras lagoas mais preservadas (Abaeté-Catu, por exemplo). Os teores oscilam entre 28 e 32mg/l no Abaeté, enquanto Abaeté-Catu apresentou valores entre 10 e 11mg/l. Esse excesso de cloretos pode ser atribuído ao lançamento de esgotos sanitários na Lagoa.

Os resultados comparativos entre Abaeté e Abaeté-Catu indicam que a primeira sofre um processo avançado de eutrofização por interferência antrópica, com o aumento da biomassa, depleção da quantidade de oxigênio dissolvido no hipolimnion, diminuição da transparência da água e surgimento e/ou proliferação de espécies mais adaptadas as condições eutróficas. A causa principal deste processo está associada à injeção excessiva de matéria orgânica devido ao lançamento de efluentes domésticos, em associação a um suposto déficit hídrico (CETREL, 1992).

## 2.6 Hidrogeologia

Em uma primeira análise superficial, poderíamos supor que a região das dunas compõem um sistema aquífero bastante simples e de fácil compreensão. Tratam-se de aquíferos livres, rasos, com uma geologia associada também relativamente simples. Quando se aprofunda o estudo, entretanto, diversas questões surgem e suas respostas não são imediatas.

Primeiro, como zonar o aquífero em termos de heterogeneidades, tanto horizontal como verticalmente? Certamente não podemos supor que todo o corpo de dunas e terraços marinhos aflorantes constituem um aquífero homogêneo. Portanto, delimitar seus subdomínios é

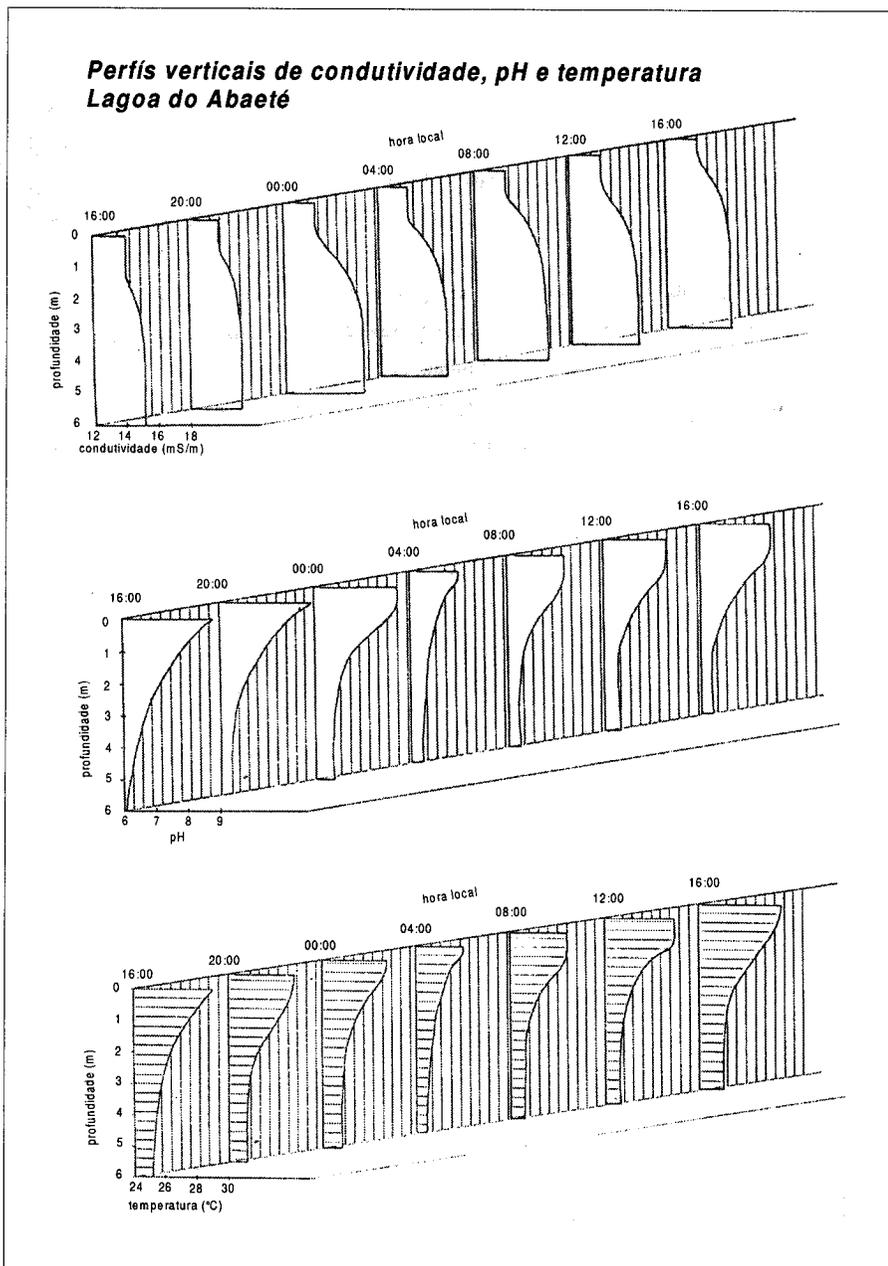


Figura 2.5: Monitoramento da condutividade (acima), pH (centro) e temperatura (abaixo) para a Lagoa do Abaeté, num ciclo de 24 horas (modificado de CETREL, 1992).

um primeiro passo para entender e modelar a hidrodinâmica subsuperficial. Nesse momento, surge a primeira dificuldade: o embasamento cristalino sob os corpos arenosos não guarda necessariamente nenhuma relação topológica com a topografia das dunas.

Segundo, de que forma podemos estimar as direções preferenciais de fluxo em cada subdomínio, caso existam? A alta permeabilidade das areias implica no fato de que a configuração topográfica do nível estático acompanha muito suavemente a configuração topográfica da superfície das dunas. As águas pluviais prontamente se infiltram nos pérmios das dunas, seguindo uma trajetória muito próxima da vertical, e rapidamente estabilizam o nível estático para uma situação próxima da horizontalidade. Portanto, o fluxo hidráulico acontece preferencialmente na horizontal e é bastante controlado pela distribuição das heterogeneidades de permeabilidades em subsuperfície.

De acordo com a exposição acima, concluímos que o entendimento da hidrodinâmica no campo de dunas e outros corpos arenosos associados depende, em larga escala, do mapeamento da subsuperfície. É óbvio que as informações obtidas com a correlação de cartas topográficas com dados de poços e/ou de afloramentos do nível estático na forma de lagoas ou zonas alagadiças são condição necessária para este estudo, mas não são suficientes.

A Geofísica assume, portanto, um papel fundamental para o zoneamento e caracterização do sistema aquífero nos campos de dunas e terraços marinhos. Sua importância decorre de que seus métodos fornecerem informações sob a subsuperfície de maneira extensiva e praticamente contínua, a um custo otimizado, com um mínimo de impacto sobre o meio-ambiente e rapidez de execução. Os cuidados todos se reservam nas etapas de processamento, interpretação e correlação com a Geologia, pois os dados sempre contém um certo grau de ambigüidade e apresentam graus de resolução variáveis.

Por fim, é senso comum de que a calibração não apenas dos levantamentos geofísicos como também do próprio mapeamento geológico deve estar amarrada em dados obtidos diretamente da subsuperfície, principalmente através de furos estratigráficos localizados de modo estratégico. Essa é uma etapa que não foi atingida neste trabalho.

Grosso modo, pode-se afirmar que o sistema aquífero na região é composto pelo acoplamento hidráulico dos terraços marinhos, leques aluviais coalescentes, dunas e embasamento cristalino fraturado. Os sedimentos areno-argilosos fluviais e flúviolagunares são tidos como aquíferos ou aquícludes (em função do teor de argilominerais) localizados, formando de certo modo desviadores do fluxo subterrâneo. As rochas cristalinas sem fraturas (“fechadas”) são tidas como os aquíferos de toda a região, compondo sua base totalmente impermeável. Essas barreiras de permeabilidade podem ter também um comportamento errático com respeito à sua disposição espacial.

A rede de drenagens superficial na área é escassa, conforme já mencionado, e supõe-se que a principal recarga ocorre diretamente pela precipitação pluviométrica sobre os corpos de dunas. Trata-se de uma superfície considerável de recarga, em uma região de clima sem estação seca definida, segundo o critério de classificação de Köppen. Entretanto, fatores como a baixa taxa de cobertura vegetal, os fortes ventos devidos a proximidade do litoral, a alta permeabilidade e baixa capacidade calorífica da areia conferem a região uma evapotranspiração potencial elevada.

## CAPÍTULO 3

# Aspectos Teóricos das Técnicas Geofísicas

Conforme explanado anteriormente, o emprego do ferramental geofísico é indispensável para uma avaliação racional do sistema aquífero não apenas na área do Abaeté, mas também para todo o campo de dunas que se estende ao norte de Salvador.

O papel da Geofísica é fornecer subsídios e guias para o estudo da compartimentação geológica e mapear o topo do nível freático. Dada a ambigüidade inerente aos métodos geofísicos, tanto mais preciso será o resultado final quanto maior for a diversidade de técnicas aplicadas. Cada técnica geofísica apresenta um grau de resolução e profundidade de exploração próprias. Portanto, a escolha do conjunto de técnicas para integração deve primar por: (i) adequação ao ambiente geológico, (ii) resolubilidade dos alvos, (iii) abrangência em termos da profundidade de exploração desejada e (iv) viabilidade operacional e financeira.

Após uma primeira análise do alvo geológico e uma visita a área, decidiu-se pelo emprego de três técnicas: o radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar - GPR*), a eletroresistividade e a magnetometria. Esse conjunto de ferramentas, a seguir detalhadas, mostrou cumprir os compromissos acima listados.

### 3.1 Radar de Penetração no Solo

O Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar*) é uma técnica eletromagnética no domínio do tempo, análoga à técnica sísmica de reflexão. Basicamente, consiste na emissão de um pulso eletromagnético de alta frequência por uma antena transmissora e no registro deste pulso ao longo de um determinado tempo através de uma segunda antena.

A energia emitida é irradiada em diversas direções, segundo um padrão próprio da antena, penetrando em parte na subsuperfície. Esta energia é particionada, devido a reflexões e/ou difrações que ocorrem sempre que uma superfície de separação de dois meios com propriedades elétricas distintas é iluminada. A forma final dos dados consiste numa matriz 3-D (posição espacial, tempo, amplitude), resultante dos registros do pulso emitido e refletido,

para cada posição de medida.

A propagação de uma onda eletromagnética obedece às equações de Maxwell, e a resolução da equação de onda para um meio genérico heterogêneo e anisotrópico, incluindo os termos da fonte, pode ser bastante complexa. Adotando a simplificação de um meio desprovido de fontes, temos o seguinte par de equações:

$$\nabla^2 \vec{E} + \kappa^2 \vec{E} = 0, \quad (3.1)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \kappa^2 \vec{H} = 0, \quad \text{onde:} \quad (3.2)$$

$$\kappa^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega. \quad (3.3)$$

Como as frequências de operação do *GPR* são altas, os parâmetros de polarização predominam sobre os de condução. Deste modo, a constante dielétrica complexa assume um importante papel na descrição do meio:

$$K^* = K + iK'', \quad (3.4)$$

com  $K$  equivalente a parte real da constante dielétrica ( $\epsilon/\epsilon_0$ ) e  $K''$  representando a parte imaginária, relacionada aos termos de atenuação:

$$K'' = K'(\omega) + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}, \quad (3.5)$$

na qual  $K'(\omega)$  representa o termo associado ao fenômeno de relaxação da polarização do meio (dependente da frequência) e  $\sigma$  representa a condutividade em corrente contínua ( $\omega = 0$ ).

A partição de energia em uma interface dielétrica separando o  $i$ -ésimo meio do  $(i+1)$ ésimo meio abaixo, para uma condição não atenuante, é regida pelo coeficiente de reflexão:

$$r_i = \frac{\sqrt{K_i} - \sqrt{K_{i+1}}}{\sqrt{K_i} + \sqrt{K_{i+1}}}, \quad (3.6)$$

Pode-se provar que a condição de dispersão do meio está relacionada aos termos de atenuação da onda eletromagnética. Assumindo a solução harmônica de onda plana em um meio homogêneo e isotrópico, propagando na direção vertical, temos:

$$E(z, t) = E_0 e^{i(\pm \kappa z + \omega t)} \quad (3.7)$$

na qual  $E_0$  é a amplitude do sinal inicial. Considere o número de onda dado como  $\kappa = a - bi$ . Analisando mais detidamente, encontra-se para  $a$  e  $b$ , usando 3.3:

$$a = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (3.8)$$

$$b = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (3.9)$$

Considere agora uma expansão em série de Taylor para a função  $f\left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right) = \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}}$ :

$$f\left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(0) \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^n}{n!} = 1 + 0 + \frac{\sigma^2}{2\epsilon^2 \omega^2} + 0 + \dots \quad (3.10)$$

Quando  $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \ll 1$ , podemos obter as seguintes aproximações para  $a$  e  $b$ :

$$a = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad \text{e} \quad (3.11)$$

$$b = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (3.12)$$

o que justifica fazer  $b \simeq 0$ .

Substituindo estes resultados na equação 3.7, e tomando uma frente de onda (fase constante,  $\kappa z + \omega t = cte$ ), temos:

$$(\omega\sqrt{\mu\epsilon})z + \omega t = cte, \quad (3.13)$$

$$(\omega\sqrt{\mu\epsilon})dz + \omega dt = 0, \quad \text{logo:} \quad (3.14)$$

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (3.15)$$

Se considerarmos o termo imaginário ( $b \neq 0$ ), associado a atenuação, surge uma dependência da velocidade de fase com a frequência, o que caracteriza a dispersão:

$$(\omega\sqrt{\mu\epsilon} - i\frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}})z + \omega t = cte, \quad (3.16)$$

$$(\omega\sqrt{\mu\epsilon} - i\frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}})dz + \omega dt = 0, \quad \text{logo:} \quad (3.17)$$

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{\mu\epsilon} - i\frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}} \quad (3.18)$$

A atenuação pode ser estimada utilizando-se a seguinte aproximação:

$$\alpha = \frac{1.690(\sigma + \omega K'\epsilon_0)}{\sqrt{K}} dB/m \quad (3.19)$$

Dois outros fenômenos controlam a penetração do sinal de radar no subsolo. O efeito de relaxão molecular da água, apesar de ocorrer próximo a frequência de 10GHz, interfere na propagação da onda eletromagnética em frequências menores, limitando o uso do radar até aproximadamente 2,5GHz. O outro fator está ligado ao espalhamento da energia, o qual ocorre sempre que há camadas com espessuras próximas do comprimento de onda.

A técnica *GPR* é essencialmente uma ferramenta de geofísica rasa, cuja profundidade máxima de exploração se restringe aproximadamente aos 50 metros, sob condições favoráveis e uso de baixas frequências. Sua característica mais marcante é a extrema sensibilidade ao conteúdo em água do meio. Esse fato é prontamente explicado pela tabela 3.1. Essa discrepância de valores entre a água e os demais materiais geológicos secos confere ao radar uma excepcional capacidade de imagear até mesmo tênues barreiras de permeabilidade.

Em termos de resolução, o valor teórico ideal é de  $\lambda/4$ , onde  $\lambda = v/f$ . Porém, devido a uma série de incertezas quanto as velocidades do meio e forma de onda nos meios atravessados, estima-se uma resolução variando em torno de  $\lambda/2$  a  $\lambda/4$  (Beres and Haeni, 1991<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup>in Araújo, 1997

Material	$K$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Ar	1	0	0.30	0
Água destilada	80	0.01	0.033	$2 \times 10^{-3}$
Água pura	80	0.5	0.033	0.1
Água do mar	80	$3 \times 10^4$	0.01	$10^3$
Areia seca	3-5	0.01	0.15	0.01
Areia saturada	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Calcário	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Folhelho	5-15	1-100	0.09	1-100
Silte	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilas	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sal seco	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Gelo	3-4	0.01	0.16	0.01

Tabela 3.1: Propriedades elétricas de alguns materiais geológicos à 100MHz. (Davis and Annan,1989)

## 3.2 Eletorresistividade e Polarização Induzida

### 3.2.1 Eletorresistividade

A técnica da eletorresistividade consiste na injeção de uma corrente elétrica contínua ou de baixa frequência, através de eletrodos de corrente, e na mensuração da diferença de potencial com outros eletrodos, adequadamente posicionados. As variantes do método são muitas, podendo ser utilizadas como técnicas de sondagem e/ou perfilagem em superfície, perfilagem em poços ou ainda como tomografia. Discute-se, no presente trabalho, apenas as técnicas de sondagem e/ou perfilagem em superfície.

Uma excepcional característica do método de resistividade elétrica consiste no largo espectro desta propriedade física para os materiais geológicos. Os valores para as rochas mais comuns podem variar desde décimos até milhões de ohm.m (figura 3.1).

O ponto de partida da técnica é dado pela Lei de Ohm, que na forma vetorial relaciona o vetor densidade de corrente elétrica  $\vec{J}$  com o campo elétrico  $\vec{E}$ , em um meio material:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (3.20)$$

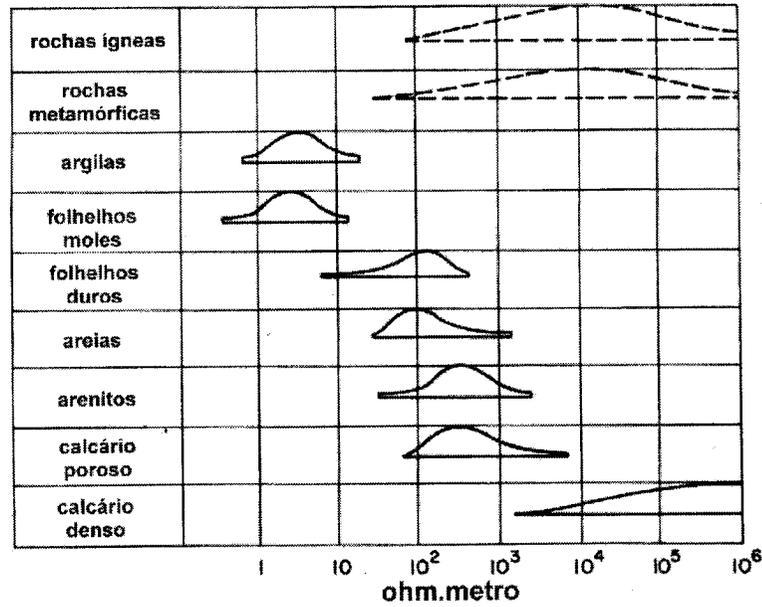


Figura 3.1: Espectro de resistividades para alguns materiais geológicos (modificado de Sumner, 1976).

A constante de proporcionalidade  $\sigma = 1/\rho$  representa a condutividade elétrica do meio ( $\rho$  é a resistividade elétrica). Essa propriedade intrínseca do meio é, genericamente, de natureza tensorial. Para um meio homogêneo e isotrópico, esta propriedade passa a ser representada por um escalar.

Admitindo um volume material homogêneo  $v$ , desprovido de fontes, podemos utilizar a condição de conservação ( $\nabla \cdot \vec{J} = 0$ ) para analisar o comportamento do potencial elétrico. Usando a equação 3.20, temos:

$$\nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = 0, \quad (3.21)$$

em meios homogêneos:

$$\begin{aligned} \nabla \sigma &= 0, & (3.22) \\ \sigma \nabla \cdot \vec{E} &= 0, \quad \text{como, por hipótese, } \sigma \neq 0: \\ \nabla \cdot \vec{E} &= 0. \quad \text{Como o campo é conservativo:} \\ \vec{E} &= -\nabla V, \quad \text{então:} \\ \nabla^2 V &= 0 \quad (\text{Equação de Laplace}). & (3.23) \end{aligned}$$

Esta última equação representa o ponto de partida para obtenção dos potenciais elétricos. A resolução desta equação diferencial têm sua complexidade controlada pela geometria (condições de contorno) admitida para o modelo de subsuperfície adotado. Diversos esquemas de resolução existem, desde aqueles totalmente numéricos (diferenças finitas, elementos finitos) até os analíticos com o auxílio de funções especiais.

O potencial para uma fonte de corrente  $I$ , num meio homogêneo semi-infinito e isotrópico, de resistividade  $\rho_m$ , avaliado a uma distância  $r$  da fonte, é dado por:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (3.24)$$

A expressão anterior contém o cerne do conceito de resistividade elétrica aparente, utilizada na aquisição e interpretação das sondagens e/ou perfilagens elétricas. Este conceito assume a subsuperfície como sendo homogênea, para cálculo da resistividade. O modelo admitido para as distribuições das heterogeneidades elétricas é quem fornecerá os parâmetros para a posterior interpretação.

Em relação ao mecanismo de condução da eletricidade nos materiais geológicos, sem sombra de dúvida sobressai a condução eletrolítica através dos fluidos que preenchem os poros interconectados da rocha ou sedimento. A Lei de Archie, obtida empiricamente com uma série de amostras de arenitos, expressa bem a dependência da resistividade da rocha ( $\rho_r$ ) com a resistividade do fluido ( $\rho_f$ ), a porosidade ( $\phi$ ) e o fator de cimentação ( $m$ ):

$$\rho_r = \rho_f \phi^{-m}. \quad (3.25)$$

Diversos outros estudos, generalizando a Lei de Archie, se encontram publicados. Dentre eles, destacamos o de Lima & Sharma (1992) para arenitos argilosos.

### 3.2.2 Polarização Induzida

O método da polarização induzida no domínio do tempo tem como base a quantificação dos efeitos de decaimento transiente do potencial elétrico após a interrupção brusca da injeção de corrente. As medidas consistem na integração da curva de decaimento transiente, em janelas de tempo pré-definidas.

Após a interrupção da corrente, o potencial não vai imediatamente a zero porque durante o processo de eletrificação do meio uma série de reações físico-químicas ocorrem, acumulando parte desta energia. Com a interrupção do estímulo externo, ocorre a liberação desta energia na forma de uma corrente elétrica transiente e queda do potencial acumulado, ao longo do tempo.

A energia armazenada decorre de dois fatores principais: (i) variações na mobilidade iônica nos fluidos através da estrutura do solo/rocha e (ii) variações entre os mecanismos de condução eletrolítica e condução eletrônica, quando há grãos metálicos presentes em sub-superfície. O primeiro fenômeno é chamado de **polarização de membrana**, enquanto o segundo tem o nome de **polarização de eletrodo**. Este primeiro fenômeno é mais importante para o presente trabalho, e por isso merece maior detalhe.

A polarização de membrana pode estar presente mesmo no caso em que não haja fluxo de corrente, quando cargas negativas desbalanceadas em argilas, por exemplo, atraem uma nuvem catiônica difusa ao seu redor. Ao submeter uma corrente elétrica no meio poroso contendo argila, estas nuvens catiônicas atuam como barreiras seletivas na migração iônica, ocasionando um “empilhamento” desses ao redor das partículas argilosas. Com o corte da corrente, ocorre um processo difusivo, não instantâneo, no qual os íons tendem a retornar à configuração inicial de concentrações. Esse é, de forma simplificada, o fenômeno responsável pela queda transiente do potencial.

O circuito elétrico conceitual mais simples, representativo deste efeito, pode ser visto na figura 3.2. Nela, podemos observar três componentes:  $R_i$  representa a resistência farádica no poro livre,  $R_b$  indica a resistência no poro bloqueado e  $R_W$  é a impedância complexa de Warburg. Esta última é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência da corrente, sua descrição no domínio do tempo é algo complicada.

### 3.3 Magnetometria

O estudo do magnetismo terrestre é provavelmente o tema mais antigo abordado pela Geofísica. O uso como ferramenta prospectiva tem um de seus registros mais antigos datando de 1640, na Suécia, para exploração de jazimentos de ferro. Nesta época, se utilizava apenas observações da variação local da declinação magnética.

Atualmente, a magnetometria consiste na mensuração, seja do campo magnético total, seja de uma ou mais de suas componentes, em diversos pontos do terreno. As oscilações locais do campo magnético podem fornecer informações qualitativas e/ou quantitativas acerca

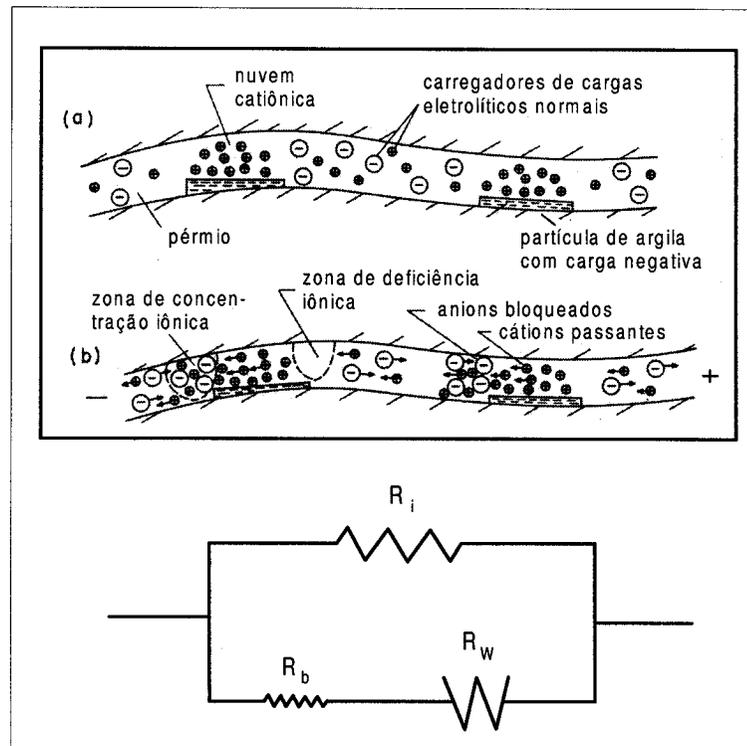


Figura 3.2: Modelo esquemático do efeito de polarização de membrana (acima) e circuito elétrico simplificado para sua modelagem. Em (a), situação de repouso, demonstrando a polarização natural devido a cargas negativas desbalanceadas do grão de argila. Em (b), efeito de bloqueio da passagem de corrente, por obstrução da passagem dos anions (modificado de Sumner, 1976).

da distribuição dos materiais geológicos, quando estes apresentam propriedades magnéticas contrastantes.

A Terra comporta-se como um gigantesco imã, cuja causa ainda não está totalmente esclarecida. Entretanto, conhece-se com grande detalhe o seu comportamento e configuração. Pode-se aproximar o campo geomagnético como aquele produzido por um dipolo com os pólos geomagnéticos localizados em  $78^{\circ}30'N, 69^{\circ}W$  e  $78^{\circ}30'S, 111^{\circ}E$ , eixo inclinado com  $11^{\circ}30'$  em relação ao eixo  $N - S$  geográfico e centro deslocado de 300km do centro geográfico do planeta. Os pólos magnéticos verdadeiros (onde a agulha da bússola orienta-se verticalmente) não coincidem com os pólos geomagnéticos, estando nas posições  $75^{\circ}N, 101^{\circ}W$  e  $67^{\circ}S, 143^{\circ}E$ .

Variações espaços-temporais do campo ocorrem tanto em termos de intensidade como de

orientação. As mais lentas são chamadas de seculares e consistem na deriva da orientação ora no sentido leste, ora no sentido oeste, ocasionando também inversões de polaridade em intervalos de tempo mais longos. Para a geofísica de exploração, as variações sazonais e diurnas são mais importantes, pois atuam como ruído natural. Estas oscilações estão principalmente atreladas à interação entre a ionosfera, o próprio campo geomagnético e as emissões solares (plasma solar). Quando ocorre aumento da atividade solar (manchas solares), as tempestades magnéticas se tornam mais freqüentes, inviabilizando o processo de aquisição.

O campo magnético terrestre é caracterizado em qualquer ponto da superfície pelas componentes horizontal ( $\vec{H}_h$ ), vertical ( $H_v$ ), ângulo azimutal ou de declinação ( $D$ ) e ângulo de inclinação ( $i$ ) (figura 3.3). As seguintes relações entre as componentes podem ser listadas:

$$H_h^2 = H_x^2 + H_y^2 \quad (3.26)$$

$$H_t^2 = H_h^2 + H_z^2 \quad (3.27)$$

$$H_x = H_h \cos(D) \quad (3.28)$$

$$H_y = H_h \sin(D) \quad (3.29)$$

$$H_h = H_t \cos(i) \quad (3.30)$$

$$H_z = H_t \sin(i) \quad (3.31)$$

$$D = \arctan\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \quad (3.32)$$

$$i = \arctan\left(\frac{H_z}{H_h}\right) \quad (3.33)$$

A fonte do magnetismo está relacionada, em última instância, à circuitação elétrica. A unidade magnética fundamental é denominada de momento do dipolo magnético ( $\vec{m}$ ). Para uma corrente elétrica de intensidade  $I$  circulando em uma espira de área  $a$ , temos:

$$\vec{m} = \frac{Ia}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\vec{n}, \quad (3.34)$$

na qual  $\vec{n}$  indica a orientação do dipolo com relação ao sentido do circuito elétrico.

A não-existência de monopólos magnéticos é contornada com alguns artifícios matemáticos, para facilitar a compreensão e manipulação algébrica. Deste modo, a força de interação  $\vec{F}_m$  entre dois pólos magnéticos de intensidade  $p_1$  e  $p_2$  separados por uma distância  $r$  é:

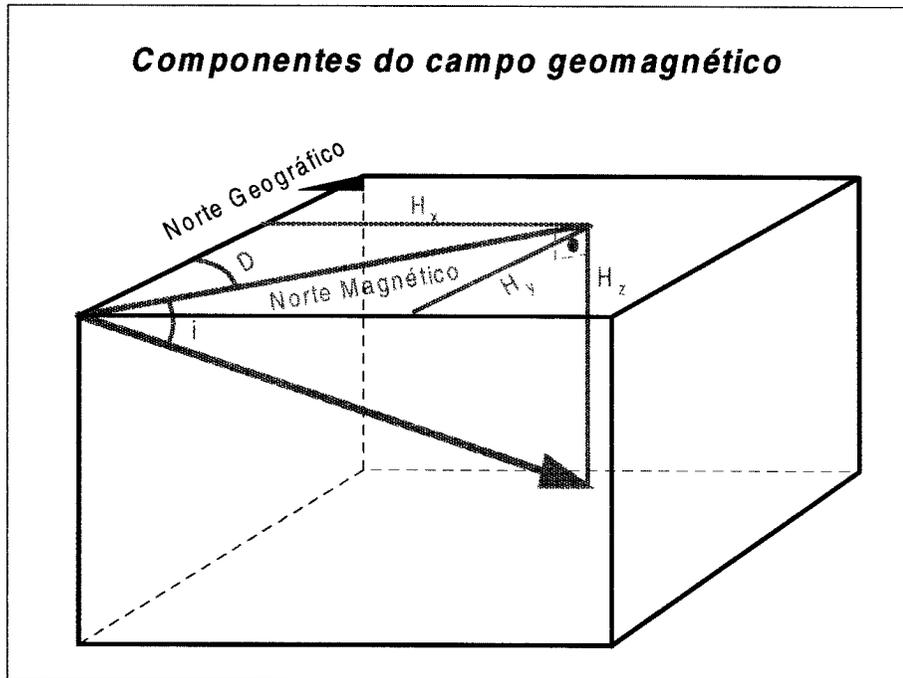


Figura 3.3: Relações geométricas entre as componentes do campo geomagnético.

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^3} \hat{r}, \quad (3.35)$$

onde  $\hat{r}$  é o versor na direção  $r$ , orientado de  $p_1$  para  $p_2$ , e  $\mu$  indica a permeabilidade magnética do meio, admitido como homogêneo e isotrópico.

A partir desta expressão, podemos desenvolver o conceito de campo magnético:

$$\vec{H} = \lim_{p_1 \rightarrow 0} \vec{F}_m = \lim_{p_1 \rightarrow 0} \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^3} \hat{r} = \frac{1}{\mu} \frac{p_2}{r^3} \hat{r}, \quad (3.36)$$

O campo magnetostático é conservativo, o que permite adotar uma função potencial magnético  $U$ :

$$\vec{H} = \nabla U, \quad (3.37)$$

$$U(\vec{r}) = \int_V \frac{\vec{M}(\vec{r}_0)}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} dV \quad \text{com:} \quad (3.38)$$

$$\vec{M}(\vec{r}_0) = p_1 \delta(\vec{r}_0 - \vec{r}_{p_1}) + p_2 \delta(\vec{r}_0 - \vec{r}_{p_2}) + \dots + p_n \delta(\vec{r}_0 - \vec{r}_{p_n}), \quad (3.39)$$

nas quais  $p$  representa intensidade de monopólo magnético e  $\vec{M}$  representa o momento magnético de dipolo por unidade de volume ou vetor magnetização.

Os materiais podem ser classificados, basicamente, em três categorias principais, no tocante as suas propriedades magnéticas: (i) diamagnéticos, (ii) paramagnéticos e (iii) ferromagnéticos. No diamagnetismo as substâncias adquirem um magnetização fraca e em sentido oposto ao campo indutor, enquanto no paramagnetismo a magnetização é fraca, porém no mesmo sentido do campo indutor. Já no ferromagnetismo, a magnetização adquirida é forte e no mesmo sentido do campo indutor, podendo mesmo ser mantida após o cessar deste último (magnetização remanente).

A indução magnética  $\vec{B}$  pode ser expressa da seguinte forma:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{com:} \quad (3.40)$$

$$\mu = 1 + 4\pi\kappa \quad (\text{sistema cgs}), \quad (3.41)$$

onde  $\kappa$  representa a susceptibilidade magnética. Por definição o valor da permeabilidade magnética do vácuo é  $\mu_0 = 1 \text{ gauss/oersted}$  no sistema cgs e  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ henry/m}$  no sistema internacional. No caso de um meio material, define-se também:

$$\mu \vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.42)$$

$$\vec{M} = \vec{M}_i + \vec{M}_r \quad (3.43)$$

onde  $\vec{M}_i$  representa a magnetização induzida e  $\vec{M}_r$  indica a magnetização remanente.

## CAPÍTULO 4

# Aquisição e Processamento dos Dados Geofísicos

### 4.1 Radar de Penetração no Solo

O equipamento utilizado nos levantamentos foi um *SIR SYSTEM 2* fabricado pela *Geophysical Sensor & Software Inc.*. O equipamento foi adquirido pelo CPPG/UFBA com uma par de antenas de múltiplas frequências (80, 40, 32, 20 e 16MHz), que variam a depender do comprimento dos elementos empregados (120, 240, 360, 480 e 600cm, respectivamente). O aparelho dispõe, ainda, de uma CPU (microcomputador 486) e um odômetro para disparos automáticos, prefixado um certo intervalo de amostragem. Esse último acessório é de grande utilidade para os levantamentos com afastamento constante, para os do tipo *WARR* e principalmente para as aquisições de famílias de tiro-comum. O odômetro é calibrado no campo, com o auxílio de uma trena, pois o giro da roda de serviço (“*survey wheel*”) depende do tipo de pavimento. O par de antenas, juntamente com o odômetro, é montado sobre dois trenós, os quais são arrastados sobre o terreno investigado.

#### 4.1.1 Técnicas de Aquisição e Processamento

Existem três maneiras clássicas de aquisição dos dados de *GPR* em superfície:

- Técnica de Afastamento Constante

Nesta técnica, o conjunto receptor-transmissor é mantido com uma separação fixa para todo o perfil levantado. A distância receptor-transmissor (“*offset*”) é empiricamente adotada como equivale ao comprimento dos elementos da antena. Essa distância deve ser tal que evite ao máximo os efeitos de acoplamento com a fonte e não saia excessivamente da condição de afastamento-nulo, a qual representa uma simplificação muito útil na interpretação dos resultados.

- Técnica de Aquisição *CMP* (*Common Mid Point*)

Consiste na aquisição dos dados deslocando-se igualmente e em sentidos opostos, a antena-fonte e a antena-receptora, partindo-se de um ponto pré-definido no terreno. Este modo de aquisição permite mensurar as velocidades das diversas camadas que por ventura existam em subsuperfície.

- Técnica *WARR* (*Wide Angle Reflection and Refraction*)

Neste procedimento, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada, em linha reta, desta primeira.

Pode-se utilizar a aquisição de diversas seções, movendo-se a fonte segundo espaços regulares pré-definidos, sobre uma mesma linha de levantamento. Desta maneira, há um certo grau de recobrimento das diversas seções, permitindo um reordenamento em várias famílias de ponto-médio comum ao longo do perfil. Esta estratégia permite um maior detalhe no imageamento dos refletores e uma melhora na determinação de velocidades em subsuperfície.

Dois dos grandes atrativos do *GPR* residem na simplicidade de operação e por praticamente dispensar maiores processamentos para uma primeira análise da imagem. Os resultados podem ser vistos em tempo real, evitando que falhas na aquisição resultem em prejuízos maiores. Entretanto, uma série de processamentos subseqüentes podem ajudar na melhoria das imagens e obtenção de parâmetros físicos do meio, como as velocidades de propagação da onda eletromagnética. A seguir estão os passos principais da seqüência normal de processamento para as seções de afastamento constante. Utiliza-se da analogia com o método sísmico e emprega-se uma seqüência muito semelhante no tratamento dos dados *GPR*.

- Pré-processamento

No processo de aquisição, os ajustes de ganhos e posição do tempo zero dos registros é semi-automática e estatística, não exigindo maiores cuidados. Entretanto, deve-se estar atento no instante desta calibração, na observação dos valores de ganho. Ganhos iniciais muitos altos indicam problemas na antena transmissora, como baterias fracas ou cabos mal conectados. Após a aquisição, registros defeituosos (traços) também podem ser eliminados.

Aplicação de *AGC* (*Automatic Gain Control*) e balanceamento de traços pode ser usados ou nesta etapa, ou após quaisquer outros processamentos que interfiram nas amplitudes dos sinais.

- Deconvolução

Cada registro consiste, em última análise, no resultado de uma convolução entre o pulso eletromagnético emitido (*wavelet*) e a série de refletividades que representa as diversas interfaces entre meios com propriedades eletromagnéticas contrastantes. O processo deconvolutório busca resgatar a série de refletividades, “afinando” a estratigrafia pela diminuição do efeito da largura da “*wavelet*” sobre os horizontes refletores. Algumas particularidades do sinal de radar exigem procedimentos especiais para a deconvolução. O primeiro decorre de que o pulso de radar não é de fase mínima (Araújo, 1997), mas sim de fase mista. Outro possível problema ocorre quando o meio é dispersivo, não preservando a estacionariedade do sinal. O uso de técnicas especiais, como deconvolução com filtros de fase mista (Porsani, 1996) e deconvolução adaptativa parecem promissoras.

- Filtragem do Sinal

Uma grande variedade de filtros podem ser aplicados aos dados, para melhorar as imagens de determinadas feições da subsuperfície. Sun & Young (1994) demonstraram a utilização de filtros no domínio F-K para realçar feições estratigráficas. Outros filtros no domínio X-T podem ser aplicados. Destacam-se como mais usuais o “*background removal*”, para destacar reflexões localizadas e/ou difrações, e o média-móvel, para ressaltar a continuidade lateral dos refletores.

- Remoção do Afastamento

O efeito do afastamento entre a fonte e o receptor afeta as reflexões mais rasas, posicionando-as com um tempo maior do que realmente ocupariam na condição de afastamento nulo. Pestana (1997) quantificou estas diferenças e propôs um algoritmo para corrigir este efeito.

- Migração

Os diversos métodos de migração adotados na sísmica podem ser adaptados para emprego nos dados *GPR*. Com a migração, pode-se verificar a validade das análises de velocidade, corrigir os efeitos de propagação do campo de ondas e converter as imagens do domínio X-T para o domínio X-Z. Trata-se de importante processamento na quantificação das seções de radar.

#### 4.1.2 Aquisição e Processamento de Famílias de Tiro-Comum - Morro do Mirante

O primeiro perfil imageado é uma pequena seção localizada na figura 4.1. Foram realizados 43 tiros com 100 recepções em cada tiro, utilizando a roda de serviço para calibração das distâncias entre as estações.

A geometria deste arranjo de famílias de tiro-comum foi estabelecida com um afastamento inicial de 150 cm, intervalo entre estações de 10 cm e progressão dos “tiros” eletromagnéticos de 20 cm. Cada registro de tiro representa um arquivo distinto, os quais foram posteriormente agrupados em um único arquivo, para manipulação com o pacote de programas *CWP* da Colorado School of Mines.



Figura 4.1: Foto com vista parcial da área, indicando a linha 1 com levantamento *shot-gather*.

No processo de aquisição, os ajustes de ganhos e posição do tempo zero dos registros é semi-automática e estatística, conforme explicado. Entretanto, durante a operação o equipamento foi acidentalmente desligado, e ao religarmos o mesmo perdemos os ajustes iniciais, gerando uma pequena diferença de ganhos e pequeno deslocamento temporal, a partir do tiro 27<sup>1</sup>. Este fato nos obrigou a realizar uma pequena correção estática devido ao deslocamento temporal causado pelo auto-ajuste do aparelho, apesar da topografia ser plana ao longo da linha de serviço.

A unificação dos arquivos, após a transferência dos mesmos para as *workstations*, se deu conforme a rotina listada em A.3.1. Neste processo, nós eliminamos os traços auxiliares (cabeçalhos) e os traços que ultrapassavam o limite de 100, uniformizando a quantidade de

<sup>1</sup>ver anexo A.1

canais por tiro. Ainda nesta rotina, foram calculados e gravados nos cabeçalhos dos traços as informações das posições do receptor ( $gx$ ), da fonte ( $sx$ ), do ponto médio comum ( $cdp$ ) e do afastamento ( $offset$ ). Esse arquivo, após a correção estática acima mencionada, foi a base de todo o processamento subsequente.

Em linhas gerais, três etapas básicas foram seguidas no processamento, quais sejam:

- análise de velocidades;
- correção de sobretempo normal (NMO) e empilhamento;
- migração.

Um processamento mais cuidadoso exigiria aplicação de correção de DMO (*Dip Move-Out*), pois como pode ser visto no anexo A.1, existe claramente refletores inclinados ao longo do perfil. Entretanto, como este foge do escopo proposto ao trabalho, nos deteremos apenas aos itens acima expostos.

#### 4.1.2.1 Análise de Velocidades

O objetivo central desta etapa é a obtenção das melhores velocidades de empilhamento e velocidades intervalares para a posterior migração, exatamente como o é na sísmica. Existem na técnica *GPR*, entretanto, algumas características peculiares, que devem ser consideradas antes do início do processo:

- o intervalo de amostragem temporal é muito menor (ns) que na sísmica, enquanto as velocidades são muito maiores (0.17 - 0.08 m/ns);
- apesar dos esforços e de resultados preliminares encorajadores, a deconvolução em dados de radar ainda não está plenamente dominada, de modo que a análise de velocidades é realizada em dados brutos, com informações contidas em *wavelets* relativamente largas;
- via de regra as velocidades decrescem com a profundidade, devido ao aumento do conteúdo em água no meio poroso. Isso implica em um cuidado adicional no uso da fórmula de Dix (1955) para obtenção das velocidades intervalares.

Observados os detalhes, realizamos três técnicas para a análise de velocidades, a seguir descritas.

**Análise de velocidades por *NMO*** A idéia básica desta técnica é aplicar uma série de correções de *NMO* para uma mesma família *CMP*, usando em cada uma das correções um campo diferente de velocidade constante. Assim podemos verificar qual a melhor velocidade de empilhamento para cada evento hiperbólico (refletor) da seção e o tempo correspondente do mesmo. A rotina descrita em A.3.2 descreve o procedimento.

O resultado do processamento aplicado ao *CMP* na posição 500 pode ser visualizado na figura 4.2.

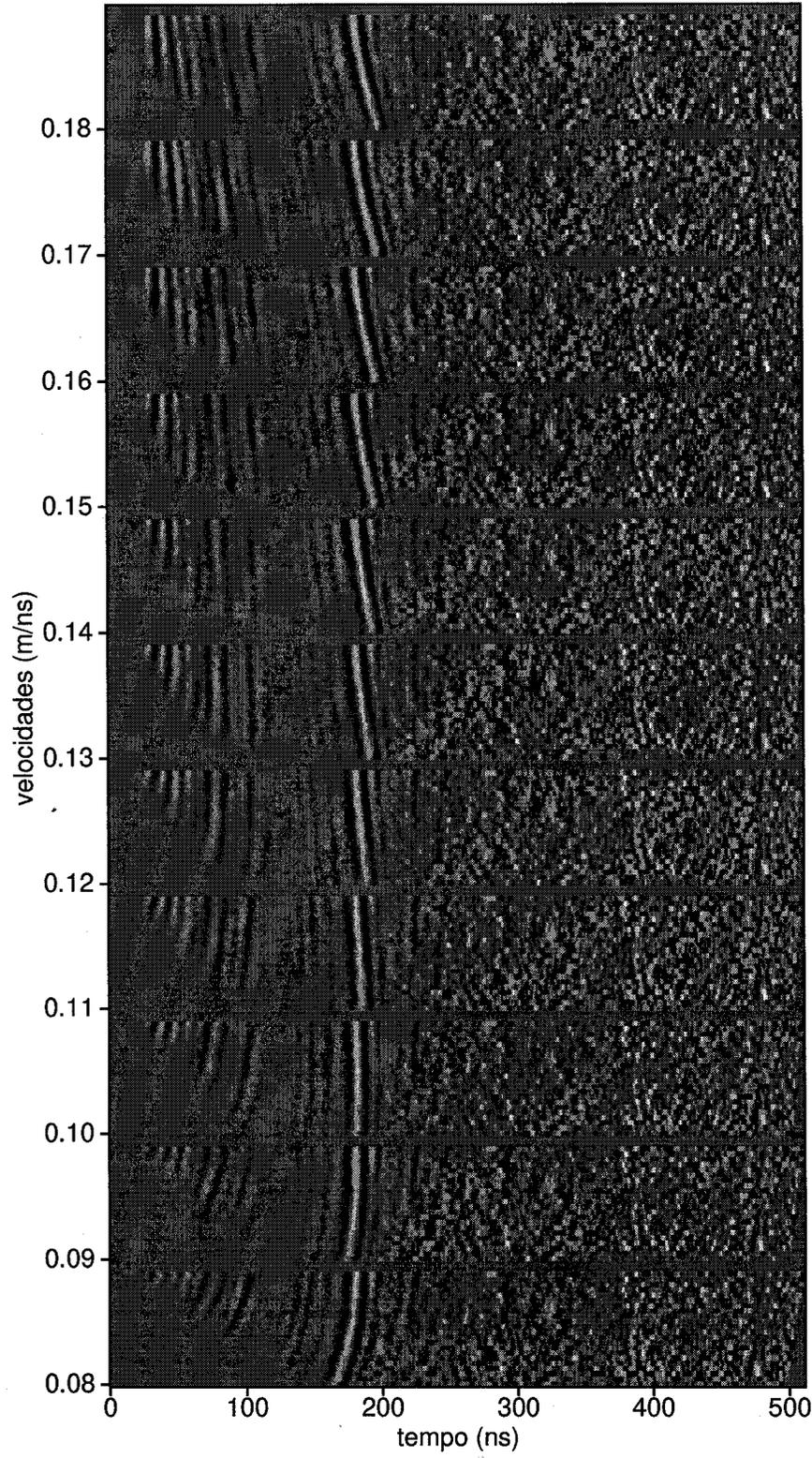


Figura 4.2: Resultado da análise de velocidades empregando a técnica de *NMO* em um único *CMP* (posição 500), para velocidades entre 0,08 m/ns e 0,18 m/ns. Os eventos mais perfeitamente horizontalizados representam os pares  $(t, v)$  corretos.

**Análise de velocidades por correção de *NMO* e empilhamento** Esta técnica se assemelha muito à anterior, porém conta com um procedimento a mais que confere maior validade as informações. Além do *Normal Move-Out*, é realizado também um empilhamento (*stacking*) dos traços da família de ponto médio comum. Com este procedimento realizado para uma série contígua de famílias *CMP*, podemos avaliar qual velocidade resulta em refletores mais coerentes, e assim determinar a função velocidade de empilhamento com uma maior validade estatística. Portanto, em síntese, temos:

- seleção da faixa de famílias de tiro comum a serem analisadas e faixa de velocidades a pesquisar;
- para cada velocidade, aplica-se em todos os *CMPs* a correção de *NMO* e empilhamento, concatenando os traços empilhados;
- por fim, monta-se uma seção com grupos de traços empilhados por cada velocidade escolhida.

A rotina listada em A.3.3 realiza estas operações, usando o pacote *CWP*.

Na figura 4.3 temos uma análise de velocidades utilizando esta técnica, para a faixa de famílias *CMPs* compreendida entre 450 e 550, com espaçamento de 5 cm, para um intervalo de velocidades de 0.08 a 0.18 m/ns.

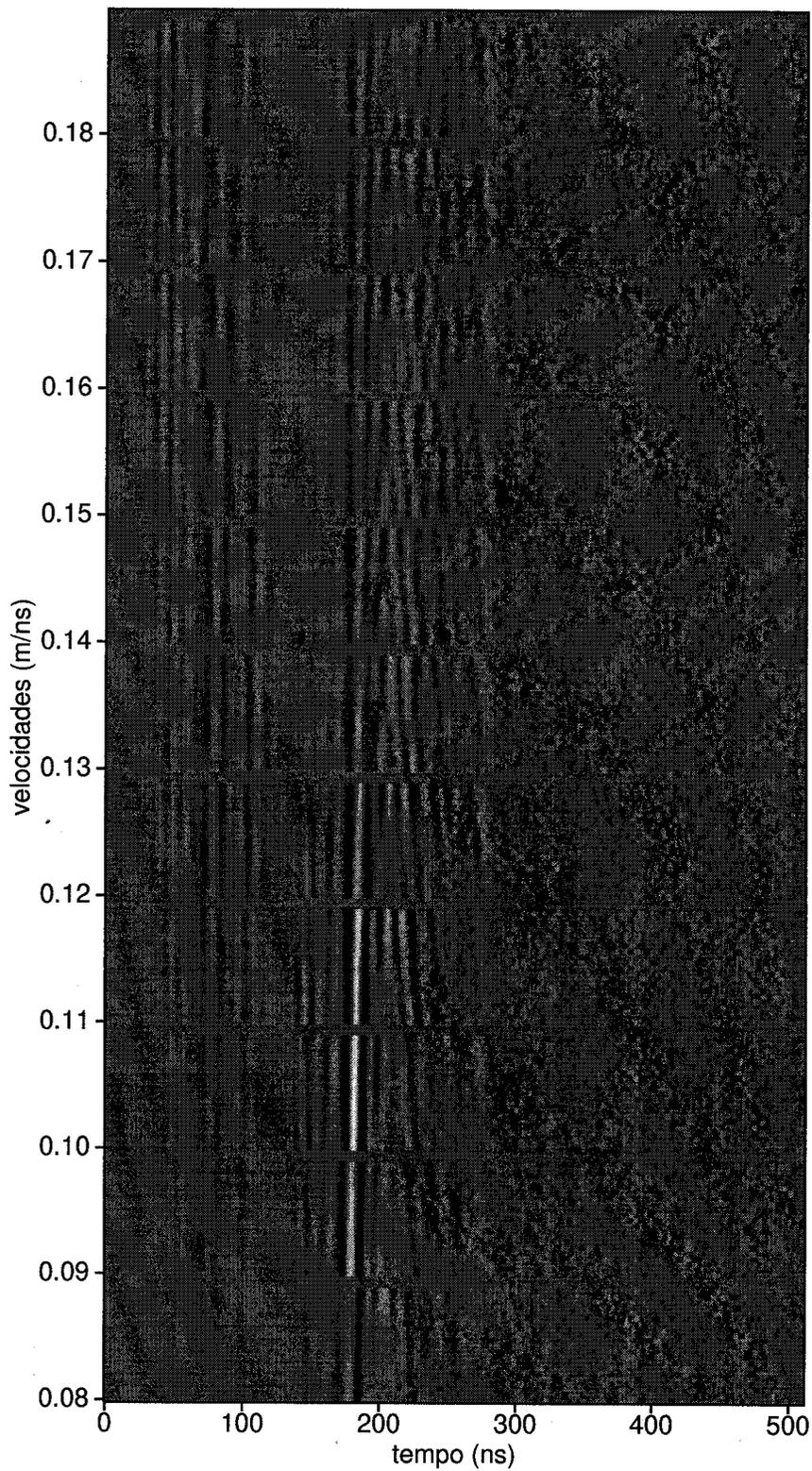


Figura 4.3: Resultado da análise de velocidades empregando a técnica de *NMO* com empilhamento, para os *CMP's* entre 450 e 550, com velocidades variando entre 0,08 m/ns e 0,18 m/ns. Os melhores pares ( $t, v$ ) são aqueles mais "acessos" (maior energia de empilhamento).

**Análise de velocidades por *semblance*** As técnicas anteriores fornecem boas indicações de velocidades, por visualização direta dos eventos que contém as informações desejadas. Entretanto, quando desejamos visualizar a função velocidade de empilhamento com maior detalhe, a melhor opção está naquilo que se define por *semblance*. A base do processo é a mesma: correção do efeito de *NMO* e empilhamento de uma família *CMP*, porém o modo de verificação do ajuste é diferente. Neste caso, ao invés de utilizar diretamente a informação de amplitudes dos traços empilhados, usa-se a informação da distribuição de energia do mesmo. Esse procedimento possibilita a utilização de um programa de contorno na comparação das “energias de empilhamento” para as diversas velocidades, fornecendo uma imagem mais direta da distribuição de velocidades com o tempo.

A rotina exposta em A.3.4 demonstra como realizar esta operação.

A figura 4.4 ilustra o resultado desta rotina.

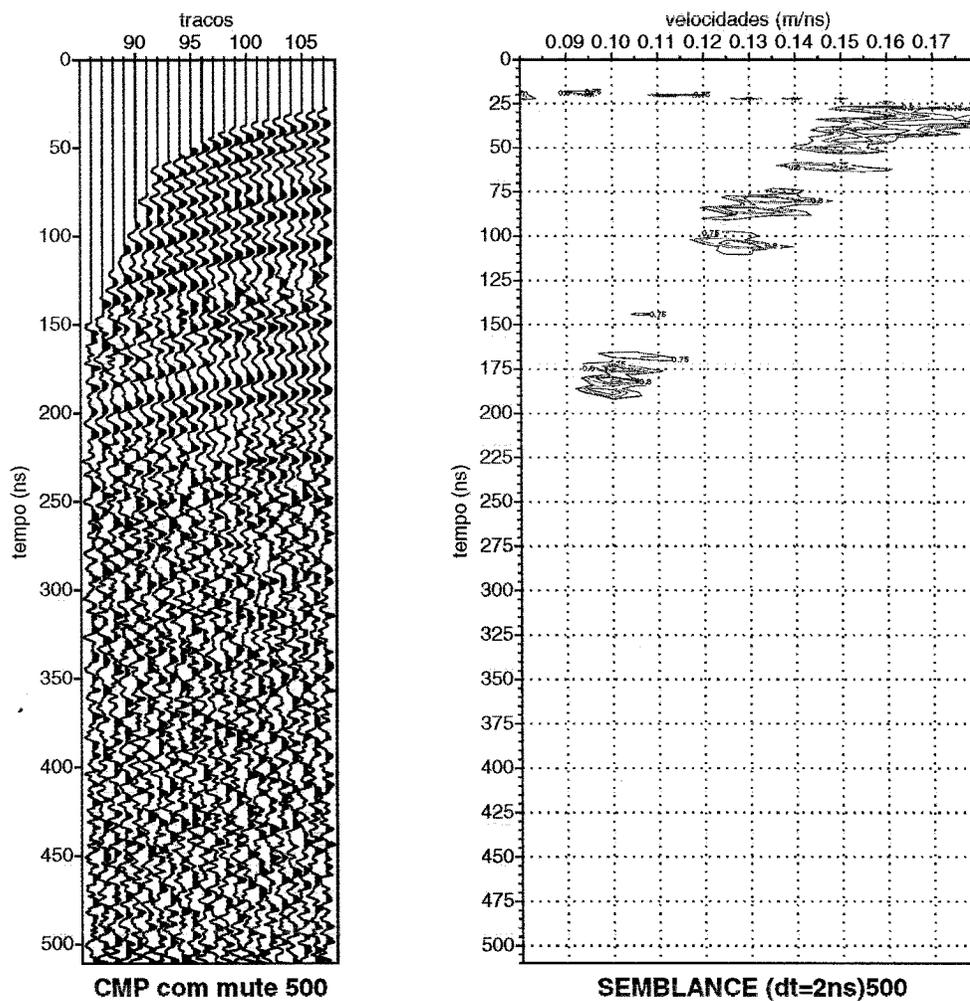


Figura 4.4: Família *CMP* com *mute* e a análise de velocidades correspondente, para a posição 500.

#### 4.1.2.2 Conversão de velocidades de empilhamento para velocidades intervalares

Após a avaliação dos resultados das diversas análises de velocidades, devemos averiguar a coerência dos resultados em relação ao empilhamento e obter as velocidades intervalares, as quais serão utilizadas posteriormente para migração dos dados. A conversão foi realizada utilizando a formulação desenvolvida por Dix (1955). Com base em sua teoria, temos para um caso de  $m$  camadas:

$$n = 2, \dots, m - 1 \quad (4.1)$$

$$V_n = \sqrt{\frac{v_n^2 t_n - v_{(n-1)}^2 t_{(n-1)}}{t_n - t_{(n-1)}}} \quad (4.2)$$

$$Z_n = Z_{(n-1)} + \frac{V_n(t_n - t_{(n-1)})}{2} \quad (4.3)$$

$$V_1 = v_1 \quad (4.4)$$

$$Z_1 = \frac{V_1(t_2 - t_1)}{2} \quad (4.5)$$

para as quais  $V_n$  e  $Z_n$  simbolizam a velocidade intervalar e a profundidade da base na  $n$ -ésima camada, respectivamente, enquanto  $v_n$  e  $t_n$  representam a velocidade e o tempo de empilhamento desta mesma  $n$ -ésima camada.

Observando a equação 4.2, percebemos que existe a possibilidade de se chegar a um valor complexo quando ocorre uma redução das velocidades de empilhamento com o tempo (profundidade). Como este valor complexo não possui significado físico, devemos adotar um procedimento para obter um valor fisicamente significante. Duas opções se seguem:

- extrair a parte real do valor complexo e adotá-la como sendo a velocidade intervalar correta ou,
- refazer ou reconsiderar a análise de velocidades, adotando valores mais adequados ao equacionamento dado por 4.2

O programa *FORTRAN* para realizar esta conversão encontra-se listado em A.3.5.

Com a posse do campo de velocidades intervalares, podemos aplicar uma rotina de suavização lateral para diminuir os efeitos de descontinuidade da análise ou, como foi feito na figura 4.5, utilizar programas de contorno para interpolar um campo de velocidades a partir das informações obtidas nos *CMP's* analisados. Neste exemplo, utilizamos o programa

*SURFER* da *Golden Software Inc.* em ambiente *PC* tanto para interpolar como para a apresentação final. A interpolação escolhida foi a com o inverso da distância, aplicando uma forte suavização lateral.

#### 4.1.2.3 Empilhamento

A idéia central do empilhamento consiste em obter um radargrama o qual em hipótese seria equivalente à uma seção de afastamento nula, ou seja, na qual fonte e receptor ocupam a mesma posição. Podemos então adotar o modelo do refletor explosivo e, por fim migrar a seção utilizando algum algoritmo baseado na equação da onda, e obtermos ao fim uma imagem em função da profundidade. O empilhamento permite verificar a coerência da análise de velocidades pela clareza com que os refletores são registrados, podendo ser um ponto de retorno (*turn-over*) no processamento.

Como efeitos benéficos adicionais, podemos listar:

- aumento da razão sinal/ruído proporcionalmente à  $\sqrt{n}$ , onde  $n$  é o numero de traços somados;
- redução do volume de dados a serem manipulados e
- atenuação de múltiplas

Realizamos o empilhamento considerando um modelo de velocidades lateralmente constante. Esse modelo foi construído tomando uma média simples do tempo de afastamento nulo e velocidade de empilhamento de cada evento (refletor) em todos os *CMPs* analisados. Este procedimento simples já permitiu a obtenção de uma boa imagem final (figura 4.6).

Nós temos o conhecimento prévio de que determinados trechos apresentam refletores inclinados, como já foi dito anteriormente. O mergulho dos refletores, para a análise de velocidades, tende a ocasionar velocidades de empilhamento maiores do que quando temos refletores horizontais, e isto resulta em um posicionamento inadequado (em tempos menores) dos refletores em relação ao tempo de afastamento nulo dos mesmos.

Com posse da seção de afastamento nulo, o processamento empregado é idêntico ao comumente empregado para seções de afastamento constante.

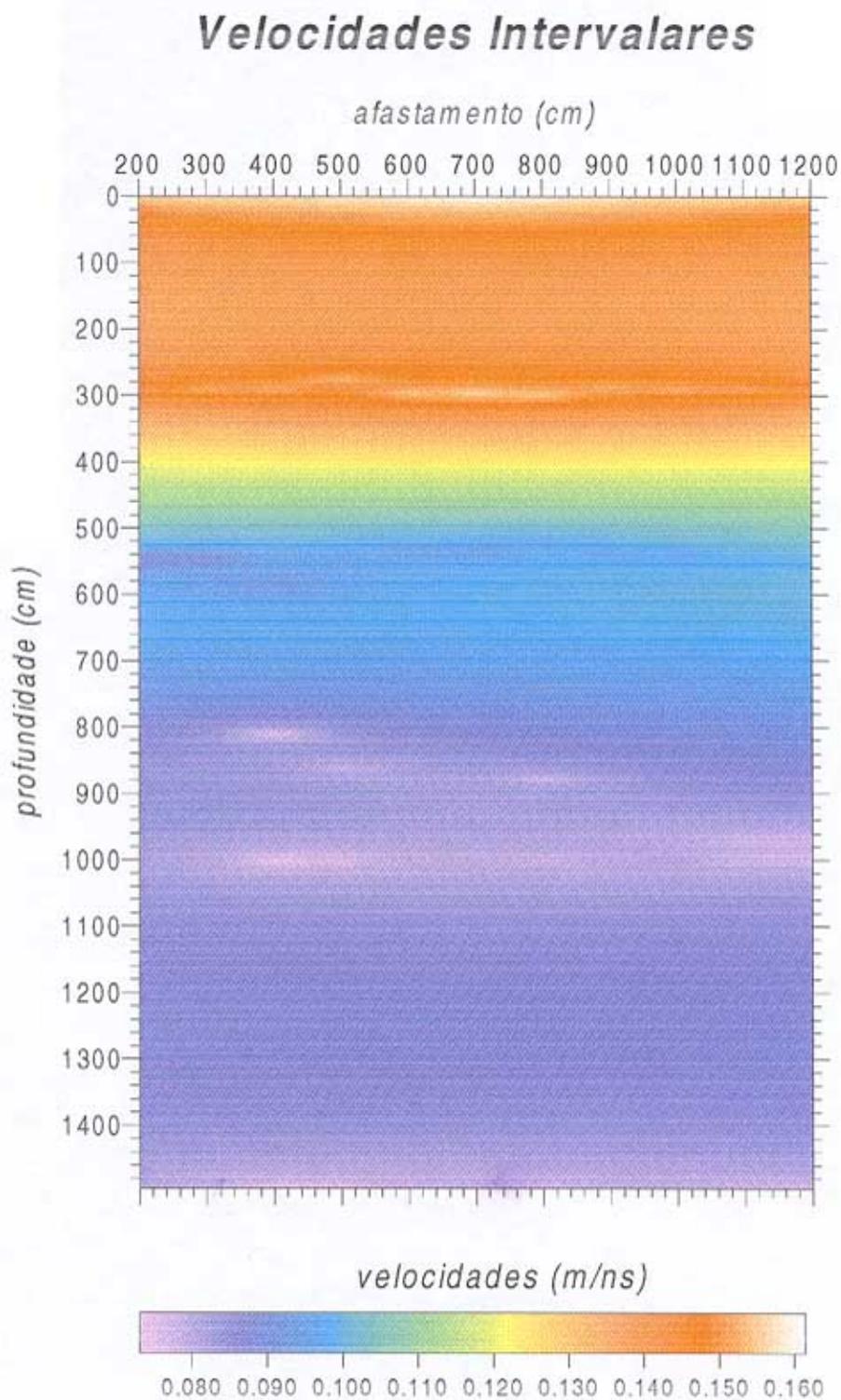


Figura 4.5: Velocidades intervalares para o trecho entre 200 e 1200 cm (referência no primeiro tiro), obtido a partir de velans espaçados de 100 cm

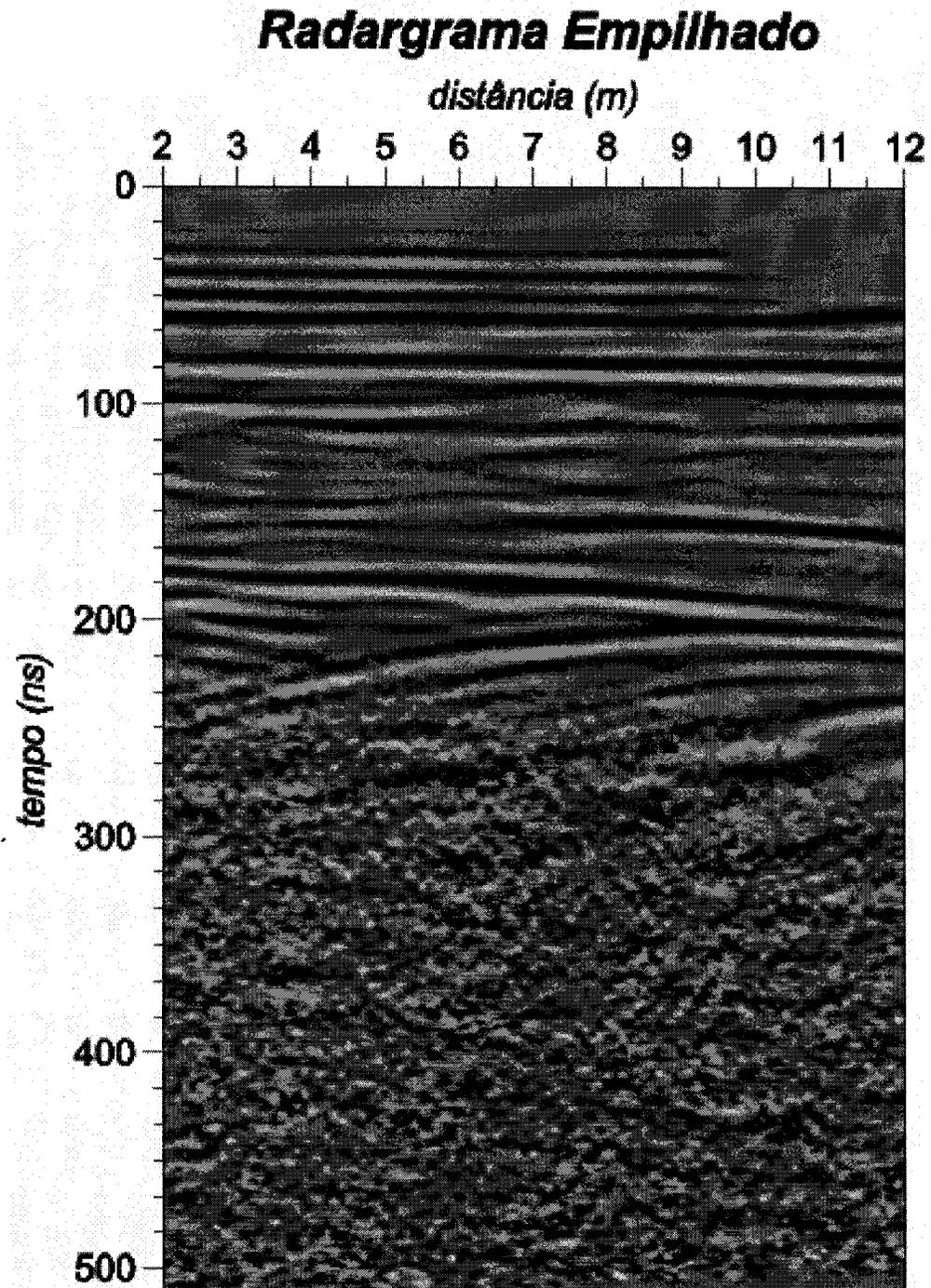


Figura 4.6: Radargrama empilhado para um modelo de velocidades lateralmente constantes, no trecho entre 200 e 1200 cm. Vide explicações no texto

### 4.1.3 Aquisição e Processamento de Famílias de Tiro-Comum - Hotel Sofitel

Uma parte da seqüência de processamento anteriormente descrita também foi aplicada em um outro local, com uma antena de mais baixa freqüência (40MHz).

Neste segundo perfil, executado no campo de golfe do Hotel Sofitel (figura 4.7), foram adquiridas 51 famílias de tiro-comum com 100 recepções cada (anexo A.2). A geometria adotada contou com um afastamento inicial de 160 cm, intervalo entre estações de 10 cm e progressão dos tiros de 10 cm.

O objetivo desta aquisição se restringiu apenas na obtenção das velocidades, para uso na migração das seções de afastamento constante realizadas neste mesmo terreno.

O resultado de uma das análises pode ser vistos na figura 4.8, 5.7 e 5.8. Percebe-se a perda de definição nas estruturas mais rasas e menor qualidade do *semblance*, devido à antena de menor freqüência adotada.



Figura 4.7: Acima, foto com vista parcial do campo de golfe e abaixo, a linha de levantamentos *WARRs*, próxima à sondagem elétrica vertical 04.

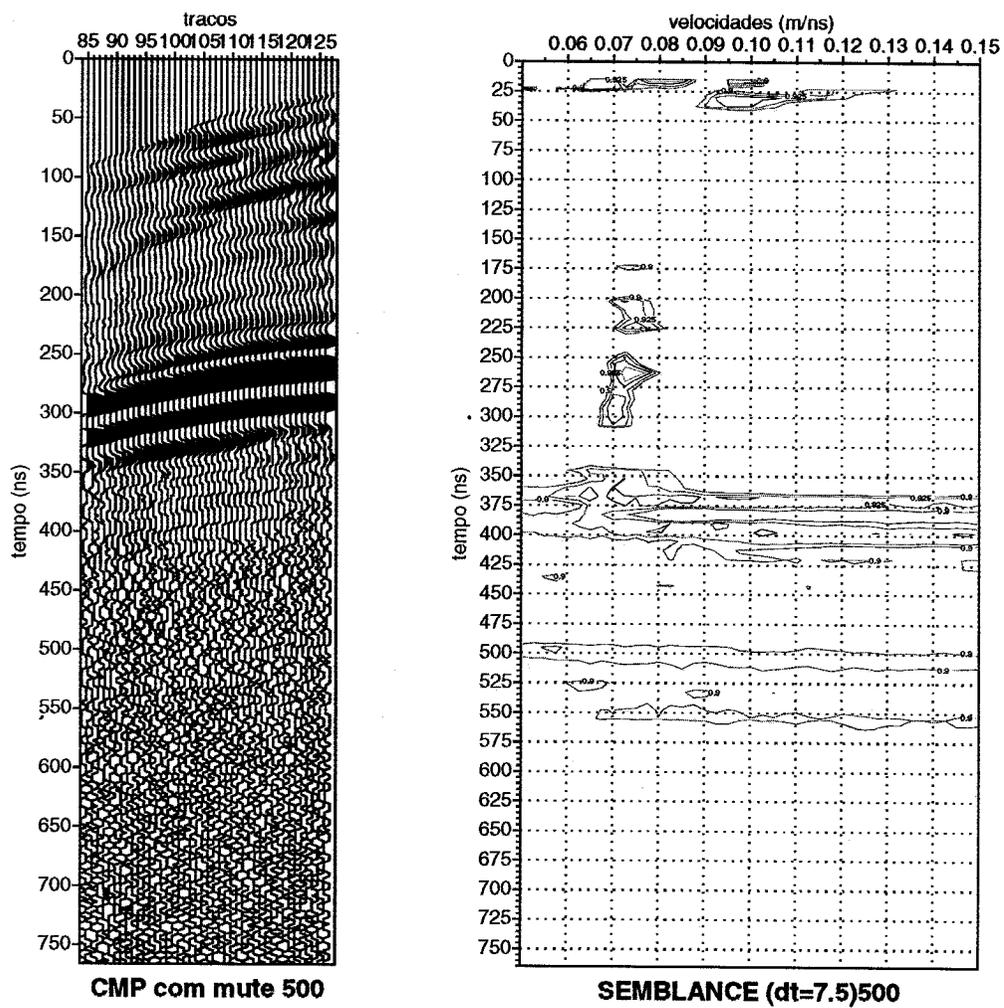


Figura 4.8: Família *CMP* com *mute* e ganho e a análise de velocidades correspondente, para a posição 500.

#### 4.1.4 Aquisição e Processamento de Seções de Afastamento Constante

Foram adquiridos 41 perfís de *GPR*. Os alvos principais consistem nos arredores da Lagoa do Abaeté e dependências do Hotel Sofitel, mas algumas outros perfís mais afastados também foram adquiridos. A antena preferida para os levantamentos foi a de frequência central em 80MHz, porém algumas outras poucas aquisições foram conduzidas em menores frequências.

Conforme explicado anteriormente, o processamento requerido nestas seções é mínimo. Dentre eles, o mais significativo, sem dúvidas, consiste na migração.

A migração, conforme explanado no capítulo anterior, objetiva retirar dos dados os efeitos da propagação do campo de ondas em subsuperfície, deslocando os refletores para mais próximo de suas posições reais em subsuperfície. Diversas técnicas se encontram disponíveis, tanto para migração em tempo como para em profundidade. Destacamos duas delas, pela importância assumida no presente trabalho. Ambas convertem os dados para profundidade:

- Migração no Domínio da Frequência

Nesta técnica, os registros são convertidos para o domínio F-K, onde se torna mais simples, por deslocamento de fase, executar o processo de retropropagação do campo de ondas. A condição de imagem para os algoritmos é dada pela soma de todas as frequências migradas, (princípio do refletor explosivo). Dois algoritmos se destacam:

Algoritmo *Phase-Shift* (Gazdag, 1978) - Este é o mais simples, no qual o deslocamento de fase se dá em uma única passada para todos os traços. Admite para tanto um meio com heterogeneidades apenas na vertical (meio com velocidades plano-paralelas e horizontais). É extremamente útil, pela sua rapidez, para migrações onde não há grandes variações laterais de velocidades ou quando se deseja obter um primeiro modelo da subsuperfície.

Algoritmo *Split-Step* (Freire, 1988) - Neste algoritmo, o processo de deslocamento de fase é executado em duas etapas. A primeira, no domínio F-K, é realizada com uma velocidade média para cada profundidade. A segunda, no domínio F-X, é realizada para cada traço (ou conjunto de traços), usando as diferenças locais entre a velocidade do modelo e a velocidade média, consistindo de pequenas correções. Esta estratégia, permite acomodar bem pequenas variações laterais de velocidade.

- Migração por Diferenças Finitas

A abordagem do processo de retropropagação do campo de ondas por diferenças finitas já é consagrado, e as variantes são muitas. Grosso modo, consiste na discretização do contínuo através da aproximação das derivadas da equação da onda por séries de Taylor. Novamente, a condição de imagem é o deslocamento do registro para o tempo  $t = 0$ , empregando o conceito do refletor explosivo.

O maior destaque destes algoritmos está na sua robustez quanto à complexidade do campo de velocidades. Variações laterais fortes podem ser bem resolvidas com este método. O maior cuidado está na escolha das dimensões da malha, a qual deve obedecer certos critérios para evitar condições de instabilidade e não-convergência. Um tratamento mais detalhado pode ser visto em Botelho (1986) e Almeida (1996).

A figura 4.9 ilustra a importância do processo de migração no correto imageamento das estruturas em subsuperfície. Na parte superior, tem-se o perfil no domínio no tempo. Percebe-se que o refletor mais profundo apresenta uma estruturação complicada na porção central, inclusive com cruzamento de linhas (“gravata borboleta”). Esta estrutura indica um foco enterrado em subsuperfície, o qual é prontamente recomposto pela migração com as velocidades corretas. Neste exemplo, usou-se a migração por diferenças finitas com correção topográfica simultânea (Botelho & Pestana). O ajuste da topografia é realizado no momento da entrada dos dados, no início do processo de propagação reversa no tempo.

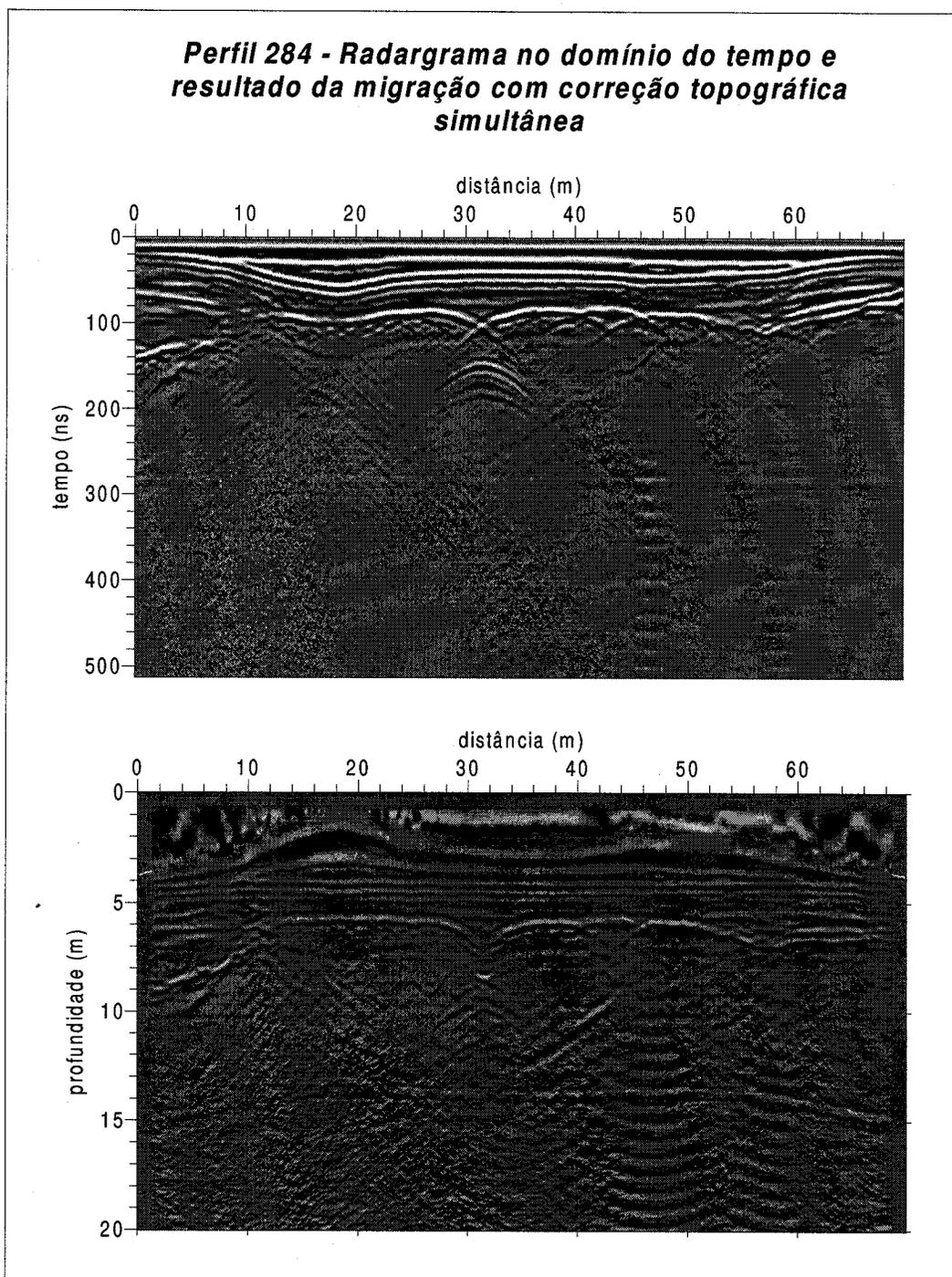


Figura 4.9: Perfil 284. Na parte superior, na seção em tempo, nota-se a estrutura de “gravata borboleta”, causada por um foco enterrado. Abaixo, a seção migrada para profundidade, com correção topográfica simultânea (Botelho & Pestana, 1996).

## 4.2 Eletrorresistividade e Polarização Induzida

A técnica de eletrorresistividade/IP permite uma investigação mais profunda, aonde o sinal do radar não consegue penetrar, além de fornecer parâmetros úteis na interpretação dos radargramas, diminuindo o grau de ambigüidade.

### 4.2.1 Aquisição e Processamento - Eletrorresistividade

Diversos arranjos dos eletrodos podem ser aplicados, cada qual originando uma expressão própria para o fator geométrico e, conseqüentemente, para a resistividade aparente. Os mais comuns são: (i) Schlumberger, (ii) Wenner, (iii) dipolo-dipolo e (iv) dipolo-pólo (figura 4.10).

A função resistividade aparente, para um arranjo qualquer de quatro eletrodos, é dada pela expressão:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN}\right)}. \quad (4.6)$$

No caso do arranjo Schlumberger, temos as seguintes expressões:

$$\rho_{as} = \frac{\Delta V}{I} \pi \left( \frac{a^2}{b} - \frac{b^2}{4} \right) \quad (\text{exata}), \quad (4.7)$$

$$\lim_{b \rightarrow 0} \rho_{as} = \frac{\lim_{b \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{b}}{I} \pi a^2 = \frac{-E}{I} \pi a^2 \quad (\text{aproximada}), \quad (4.8)$$

de onde se compreende o sinônimo de arranjo gradiente.

As sondagens elétricas verticais, quando isoladas, são em geral interpretadas com base em um modelo de camadas plano-paralelas e “infinitamente” extensas na horizontal. A adoção deste modelo facilita sobremaneira a inversão das resistividades, sendo que o procedimento mais usual utiliza o método do ponto auxiliar. Neste método, um conjunto de curvas auxiliares pré-calculadas é utilizado para obtenção das espessuras e resistividades do meio. O refinamento desta interpretação pode ser executada em computadores usando algoritmos apropriados (Marinho, 1997).

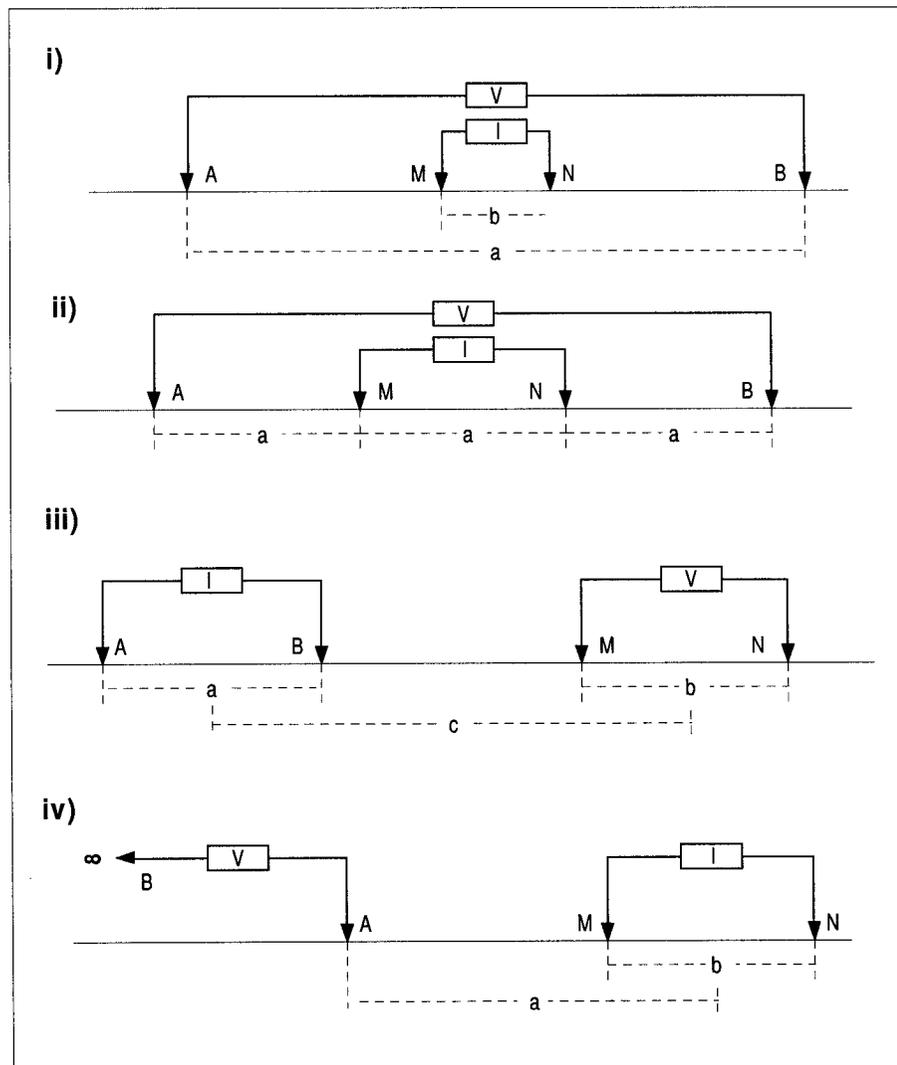


Figura 4.10: Modos mais usuais de arranjos de eletrodos para sondagens/perfilagens em superfície. (i) Schlumberger, (ii) Wenner, (iii) dipolo-dipolo, (iv) dipolo-polo.

Os perfis bi-dimensionais já apresentam maiores complicações no tratamento dos dados. A inversão automática desses dados é ainda um tema de pesquisa a nível de doutoramento. Algoritmos para modelagem direta ou seja, obtenção da resposta física a partir de um modelo suposto, são conhecidos e disponíveis no CPGG, mas não foram usados neste trabalho. Neste caso, o uso de pseudo-seções pode auxiliar grandemente na avaliação qualitativa dos dados.

Na primeira etapa, conduziu-se apenas os levantamentos de eletrorresistividade, com o equipamento *Terrameter 5310*, fabricado pela *ABEM*. O equipamento contém um transmissor e um receptor separados, ambos analógicos. A unidade transmissora dispõe de um

circuito de amplificação que possibilita um ajuste da voltagem do sinal em 400V, 200V e 100V. A fonte de energia consiste em um conjunto de 56 baterias de 1,5V (tamanho grande), totalizando 84V. O processo de medida se assemelha ao de uma ponte de Wheatstone, equilibrando um conjunto de resistências internas com aquelas da subsuperfície.

A segunda etapa, com aquisições na área do Hotel Sofitel, foi conduzida com o equipamento *SYSCAL R-2*, fabricado pela *Iris Instruments*. O equipamento dispõe de uma unidade receptora e transmissora microprocessada, totalmente digital. Realiza medidas de resistividade e polarização induzida no domínio do tempo, inclusive com repetição de medidas (*stacking*). A forma de onda é quadrada, largura do sinal ajustável entre 250ms e 10.000ms, com opção de período de repouso (corrente=0) ou não. A alimentação é realizada com uma bateria comum de automóvel (12V), amplificada para uma potência de 250W em voltagens reguláveis de 100V até 800V. Armazena até 1022 registros em uma memória interna, possibilitando conexão com um computador pessoal.

Inicialmente, foi planejada uma maior ênfase no uso de sondagens elétricas verticais. Entretanto, em função da dificuldade de aquisição no campo de dunas, o enfoque foi dirigido para o *GPR*. Essa dificuldade é função da alta resistividade da areia superficial seca, a qual diminui a intensidade da corrente elétrica circulando em subsuperfície, inviabilizando leituras coerentes da diferença de potencial entre os eletrodos de potencial. Alternativas de aquisição durante o período de chuvas e introdução de eletrodos mais profundos foram tentadas. O uso de eletrodos profundos se mostrou inviável, devido a dificuldade de se enterrar o mesmo abaixo de 1 metro de profundidade. A aquisição durante o período de chuvas resultou em alguma melhora, mas não foi suficiente para tornar as leituras confiáveis. Aliado ao efeito da resistividade elevada, surge também o efeito acentuado da topografia no campo de dunas, o qual dificulta muito ou mesmo inviabiliza uma interpretação simples das sondagens.

As inversões considerando meios unidimensionais foram realizadas em duas etapas. Na primeira, utilizando o método do ponto auxiliar, se definiu um primeiro modelo de resistividades para cada sondagem. Esse modelo então foi melhorado, de maneira automática, empregando o programa *RESIST 1.0* desenvolvido por Vander Velpen da *Delft University*. A figura 4.11 ilustra os resultados deste procedimento executados para a SEV01, adquirida no Hotel Sofitel.

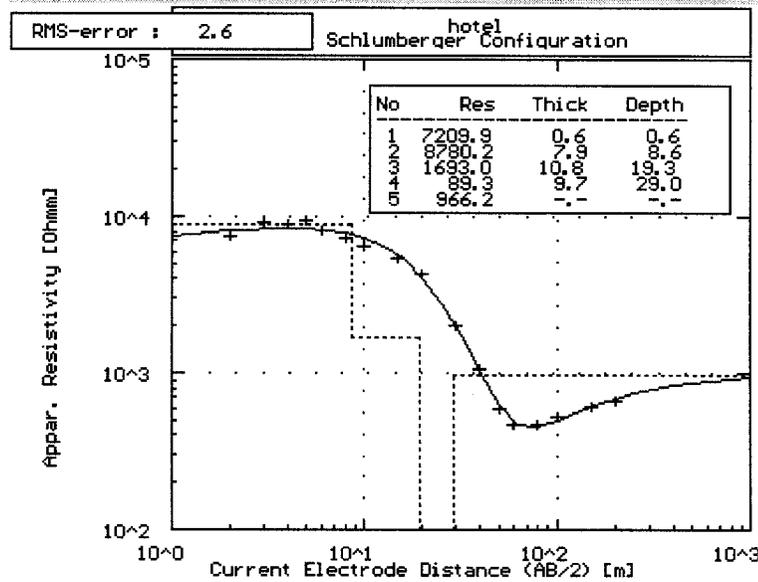
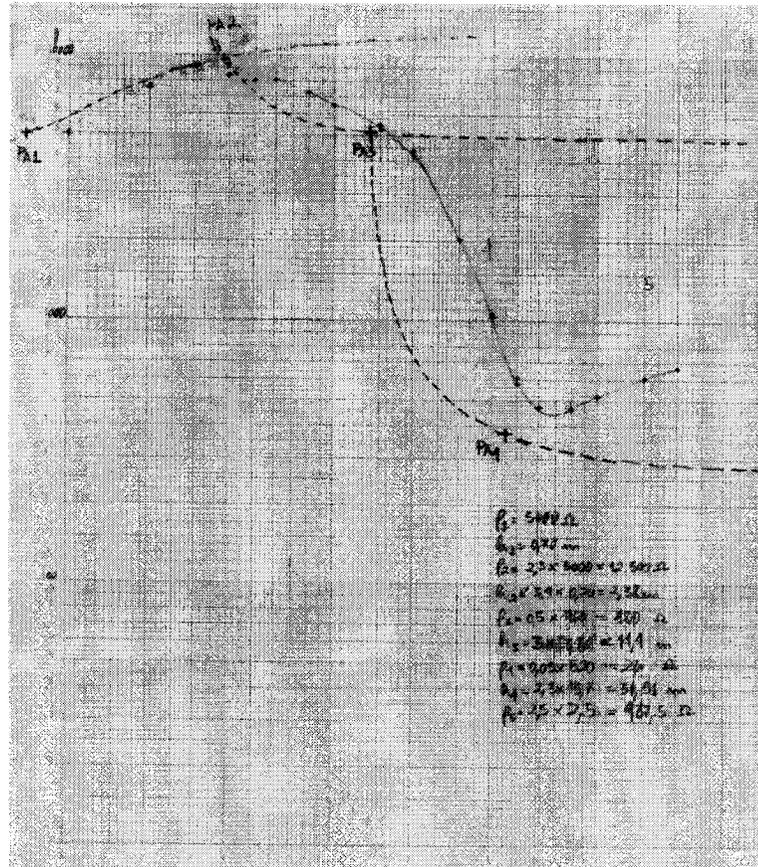


Figura 4.11: Acima, inversão unidimensional da SEV01 com o auxílio de curvas especiais (método do ponto auxiliar). Abaixo, o resultado do refinamento utilizando o programa *RESIS 1.0*

### 4.2.2 Aquisição e Processamento - Polarização Induzida

As medidas conduzidas no domínio do tempo fornecem dados de cargabilidade do meio. A cargabilidade  $M$ , cuja dimensão é de tempo, defini-se como:

$$M = \frac{1}{V_m} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt, \quad (4.9)$$

na qual  $V_m$  é a voltagem máxima, na situação anti-causal ( $t \leq 0$ ),  $[t_1, t_2]$  é o intervalo de amostragem e  $V(t)$  é a função transiente do potencial elétrico. Os arranjos de eletrodos são os mesmo para o caso da eletrorresistividade, sendo geralmente preferido o arranjo dipolo-dipolo.

Em termos de processamento, diversos algoritmos são propostos, muitos deles ainda com pesquisa em andamento, para estimar outros parâmetros descritivos do meio. Entretanto, a discussão destes algoritmos não cabe no escopo deste trabalho.

A interpretação dos dados de IP é conduzida, genericamente, de forma qualitativa em pseudo-seções, integrada com a resistividade. Neste tocante, cabe salientar que o efeito de IP não cresce monotonicamente com o aumento do conteúdo de argila, mas apresenta um máximo para uma dada percentagem volumétrica do argilomineral, após a qual passa a decrescer. Deste modo, areias argilosas são muito mais propícias de que folhelhos, por exemplo. O efeito de IP também é reduzido com o aumento da condutividade (salinidade) do fluído intersticial.

## 4.3 Magnetometria

A magnetometria pode ser considerada como uma das mais versáteis técnicas geofísicas, no que tange ao processo de aquisição. Levantamentos marinhos, aéreos e terrestre são largamente aplicados, tanto com medidas absolutas como com medidas relativas do campo. Dentre os diversos tipos de equipamentos, destacam-se os de saturação (*flux-gate*), de precessão de prótons e os de bombeamento ótico. Todos se destacam pela portabilidade e facilidade de operação em campo.

O procedimento de aquisição deve contar com uma estação-base, a qual deve ser medida em intervalos regulares de tempo. Este procedimento possibilita acompanhar as oscilações temporais do campo magnético, fornecendo uma curva de correção temporal para as demais estações. Usualmente se utiliza um intervalo máximo entre 2 e 3 horas.

Correções topográficas são necessárias quando o terreno é muito acidentado e o valor da susceptibilidade magnética do mesmo é elevado. O contraste de susceptibilidade entre o ar e o terreno produz anomalias falsas quando o terreno não é plano: nos vales, o sensor estará mais envolto por materiais magnéticos do que nas cristas. Entretanto, a depender do nível de precisão e objetivos do levantamento, este é um processamento dispensável.

Diversos tipos de manipulação e filtragens podem ser aplicados para realçar determinadas feições dos dados. Entre elas podemos citar a segunda derivada vertical do campo, redução ao pólo e obtenção do sinal analítico. A redução ao pólo procura eliminar a característica dipolar das anomalias, “rotacionando” o campo indutor para uma situação de verticalidade. O sinal analítico ressalta os contornos das anomalias magnéticas, facilitando a distinção de domínios magnéticos homólogos.

A interpretação pode ser qualitativa e também quantitativa. Diversos esquemas para modelagem de estruturas bi e tri-dimensionais são conhecidos, possibilitando inversões por tentativa-e-erro. Entretanto, a questão da ambigüidade neste método é bastante considerável, o que obriga o intérprete a utilizar outras informações *a priori* conhecidas ou estimadas.

A magnetometria foi empregada neste estudo como uma ferramenta auxiliar na configuração mais grosseira, qualitativa, da topografia do embasamento cristalino. Estas rochas apresentam um conteúdo de minerais magnéticos muito superior ao dos sedimentos quaternários, predominantemente quartzosos. Isto confere uma maior susceptibilidade magnética nas rochas do embasamento quando comparadas com esses sedimentos.

Entretanto, para uma escala de detalhe, uma avaliação mais rigorosa, quantitativa, não apresenta interesse prático. Um dos principais motivos é o efeito topográfico, o qual pode ser considerável para o grau de refinamento exigido neste caso (20-30nT). Outro motivo advém da dificuldade em compor malhas regulares de amostragem neste terreno: a presença ostensiva da vegetação de dunas dificulta os acessos em certos locais e obviamente não se pode pensar em abrir picadas nesta vegetação.

Um levantamento magnético foi conduzido nos arredores da Lagoa do Abaeté. Foram medidas a intensidade relativa da componente vertical do campo em 135 estações. Utilizou-se para tanto um magnetômetro tipo *flux-gate*, analógico, fabricado pela *Scintrex Geophysical Equipment Inc.*. Dada a precisão requerida nas medidas, utilizou-se também um tripé para apoio e verticalização do equipamento nos pontos de medida. Além da correção temporal usualmente adotada, diversas repetições das medidas foram executadas, de modo que o valor final registrado em cada estação corresponde a uma média aritmética de várias medidas.

Os resultados podem ser vistos no capítulo 5.

# CAPÍTULO 5

## Análise dos Levantamentos Geofísicos

### 5.1 Radar de Penetração no Solo

#### 5.1.1 Análise dos Resultados do Processamento de Famílias de Ponto-Médio Comum Obtidas a Partir de Famílias de Tiro-Comum

O principal objetivo deste processamento consiste na obtenção das velocidades intervalares com grande acurácia, algo difícil de ser obtido com apenas algumas famílias *CMP* (*Common Mid Point*). Além disto, considerando a simplificação dada pela equação 3.15, com as velocidades intervalares pode-se inverter a constante dielétrica do meio, a qual pode ser convertida em outros parâmetros petrofísicos, como saturação em água, por exemplo.

Outro grande trunfo está no refinamento das imagens, detalhando a estratigrafia no trecho imageado. Essas imagens obtidas pelo empilhamento dos traços das famílias de ponto-medio comum satisfazem a condição de afastamento nulo, posicionando os eventos mais rasos adequadamente. Isso não ocorre na aquisição com offset constante.

##### 5.1.1.1 Morro do Mirante

Conforme pode ser visto no capítulo 4, as análises de velocidades indicaram uma diminuição progressiva das velocidades intervalares, com algumas anomalias localizadas (figura 4.5). Quatro níveis característicos podem ser destacados. O primeiro, da superfície até a profundidade média de 4,0 metros, com as velocidades em torno de 0,14m/ns, representa a porção de areia seca. O segundo nível, na faixa de profundidades entre 4,0m e 5,0m, demonstra uma gradação de velocidades de 0,12m/ns no topo até 0,1m/ns na base, representando provavelmente a franja capilar nos sedimentos arenosos. Os dois níveis seguintes, já na zona de saturação, representam dois níveis estratigráficos distintos dentro do corpo de areia. Provavelmente, o nível superior, compreendido entre 5,0m e 7,6m apresenta uma, estrutura mais fechada (menor porosidade), com velocidades em torno de 0,10m/ns. O nível mais inferior

apresenta velocidades entre 0,09m/ns e 0,08m/ns.

Alguns dos semblances processados estão ilustrados nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

A constante dielétrica também foi invertida, como pode ser visto na figura 5.5.

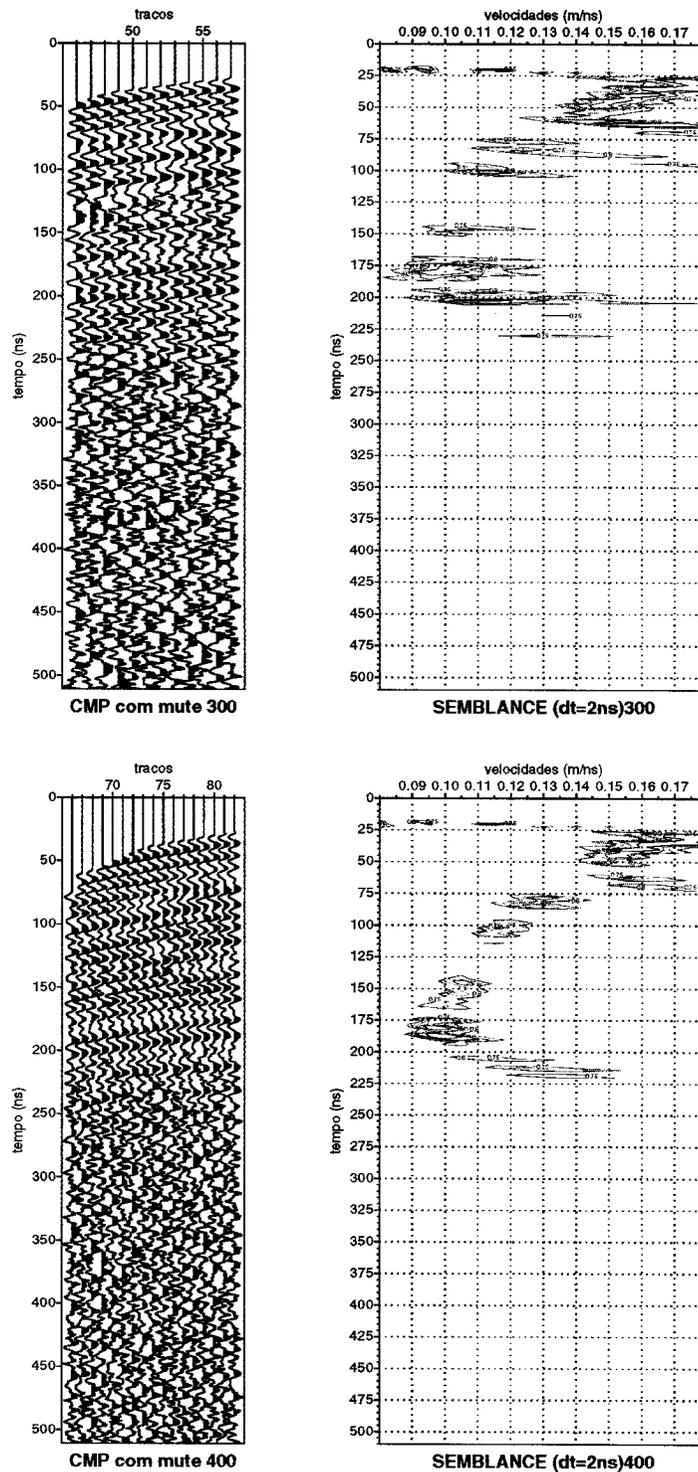


Figura 5.1: Famílias *CMP* com *mute* e a análise de velocidades correspondente, para as posições 300 (acima) e 400 (abaixo).

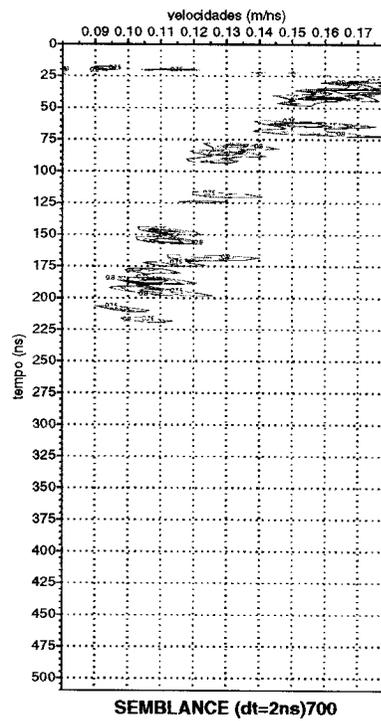
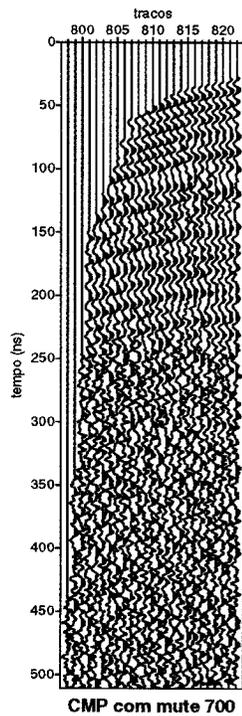
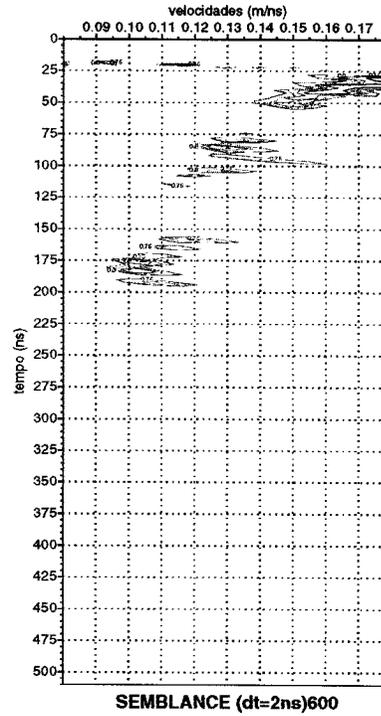
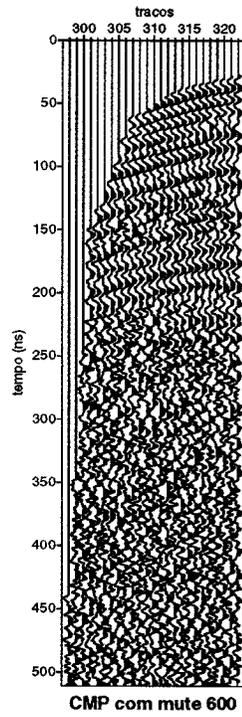


Figura 5.2: Famílias *CMP* com *mute* e a análise de velocidades correspondente, para as posições 600 (acima) e 700 (abaixo).

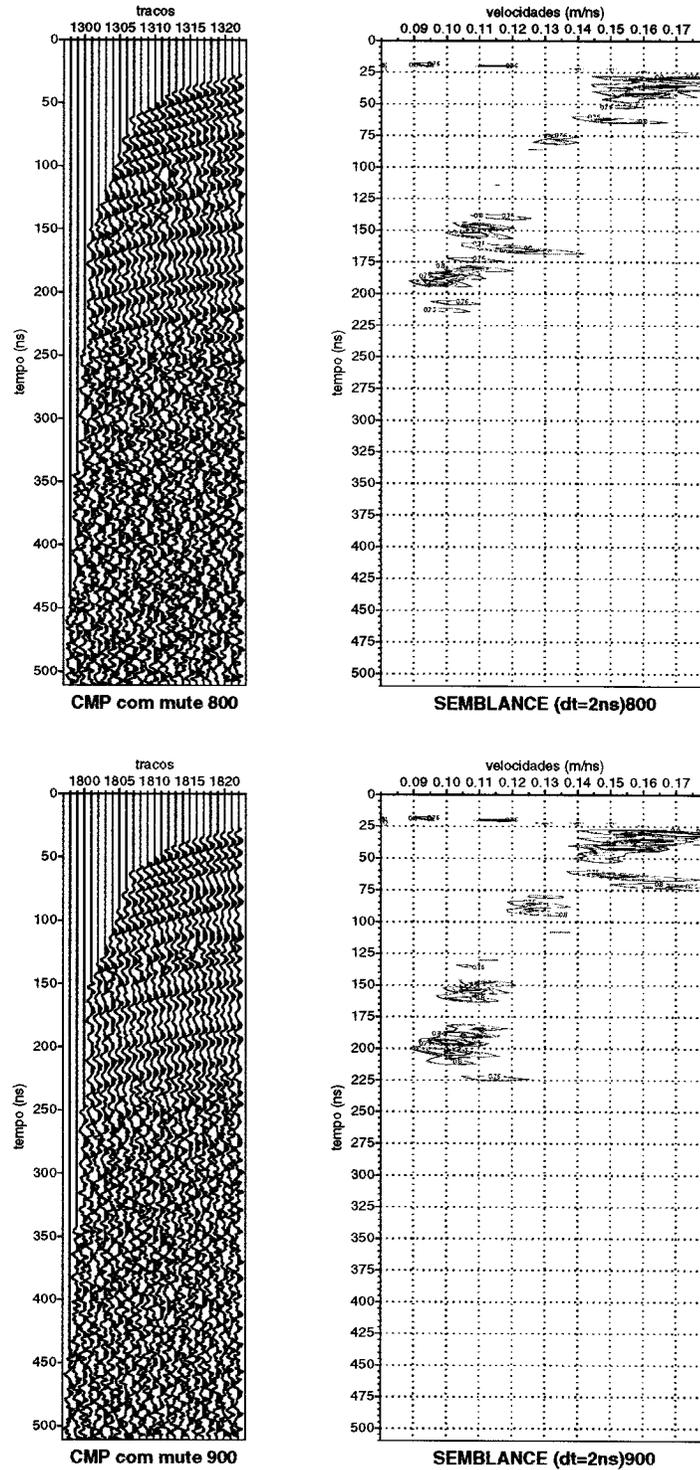


Figura 5.3: Famílias *CMP* com *mute* e a análise de velocidades correspondente, para as posições 800 (acima) e 900 (abaixo).

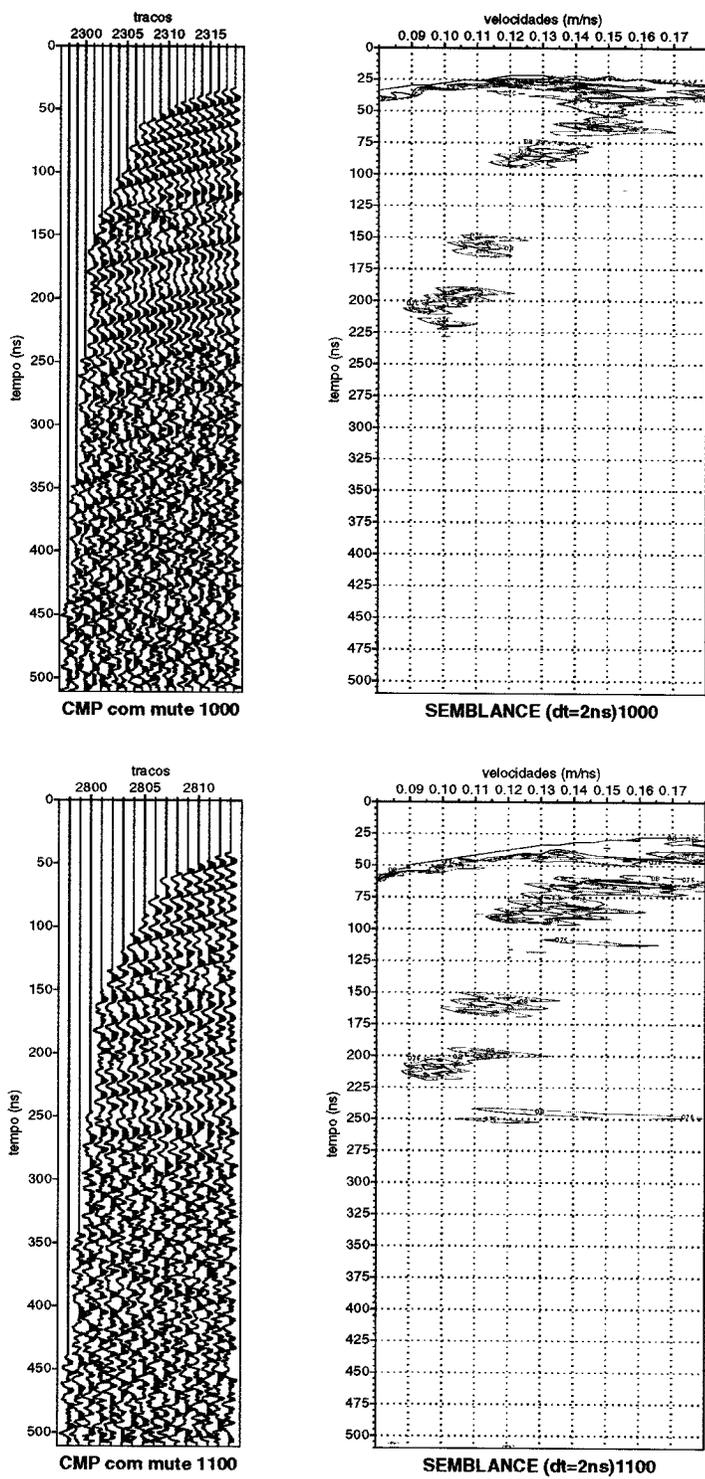


Figura 5.4: Famílias *CMP* com *mute* e a análise de velocidades correspondente, para as posições 1000 (acima) e 1100 (abaixo).

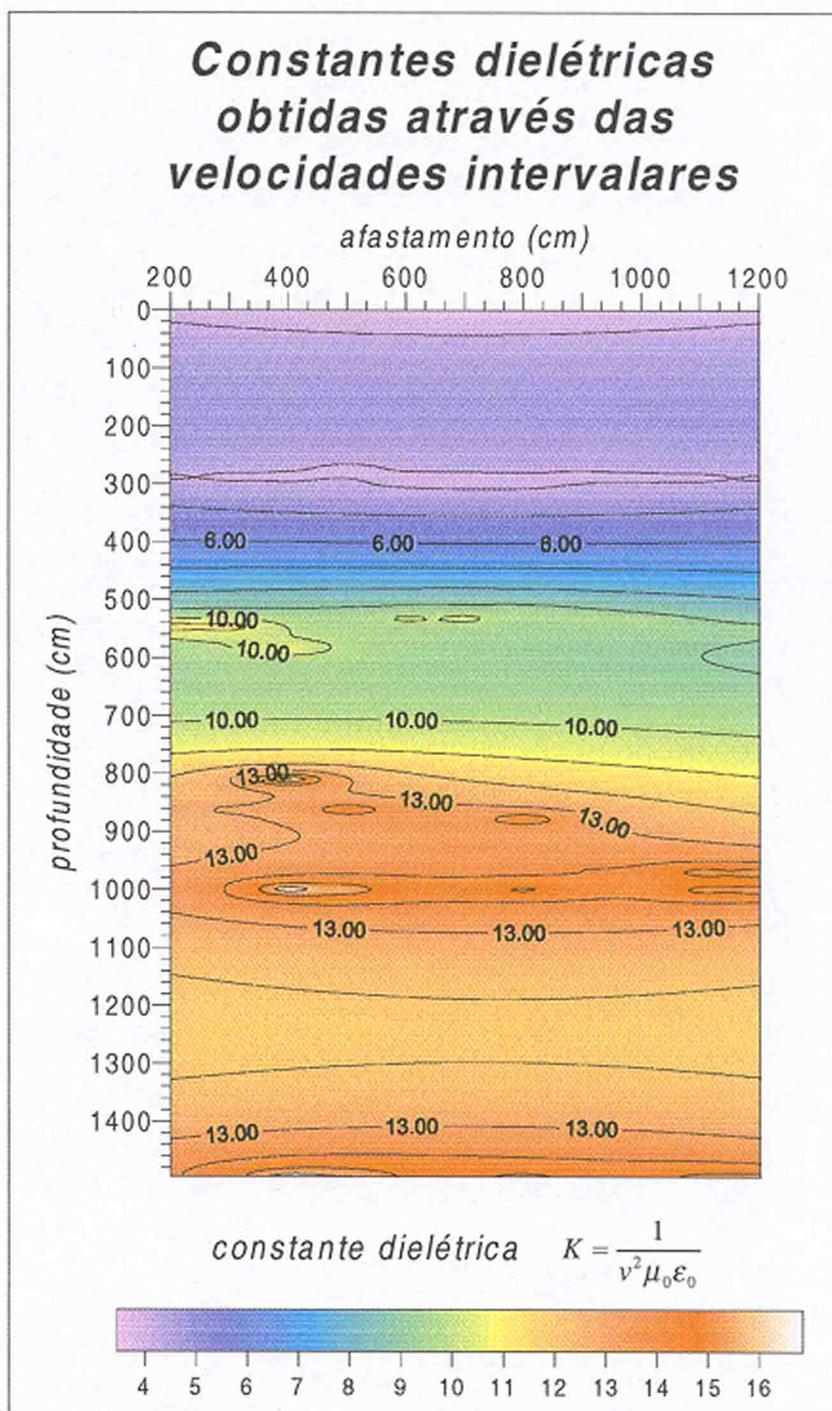


Figura 5.5: Constantes dielétricas calculadas a partir das velocidades intervalares da figura 4.5.

### 5.1.1.2 Hotel Sofitel

As velocidades encontradas na área do Hotel Sofitel mostram uma diferença marcante em relação ao morro do Mirante. Nota-se as velocidades iniciais já bem baixas, em torno de 0,10m/ns já próximo a superfície. As curvas de velocidades de empilhamento obtidas com o *semblance* das diversas famílias de ponto-médio comum ilustram também uma queda das velocidades (figuras 5.6, 5.7 e 5.8) chegando até 0,07m/ns em torno do tempo de 275 ns.

Nota-se que há um menor acurácia nestes dados, quando comparamos com as curvas obtidas no morro do Mirante. Isso ocorreu basicamente pelo uso de uma menor frequência (40MHz), na tentativa de imagear feições mais profundas. Essa diminuição da frequência de operação resulta no aumento do comprimento de onda e diminuição da resolução da imagem final.

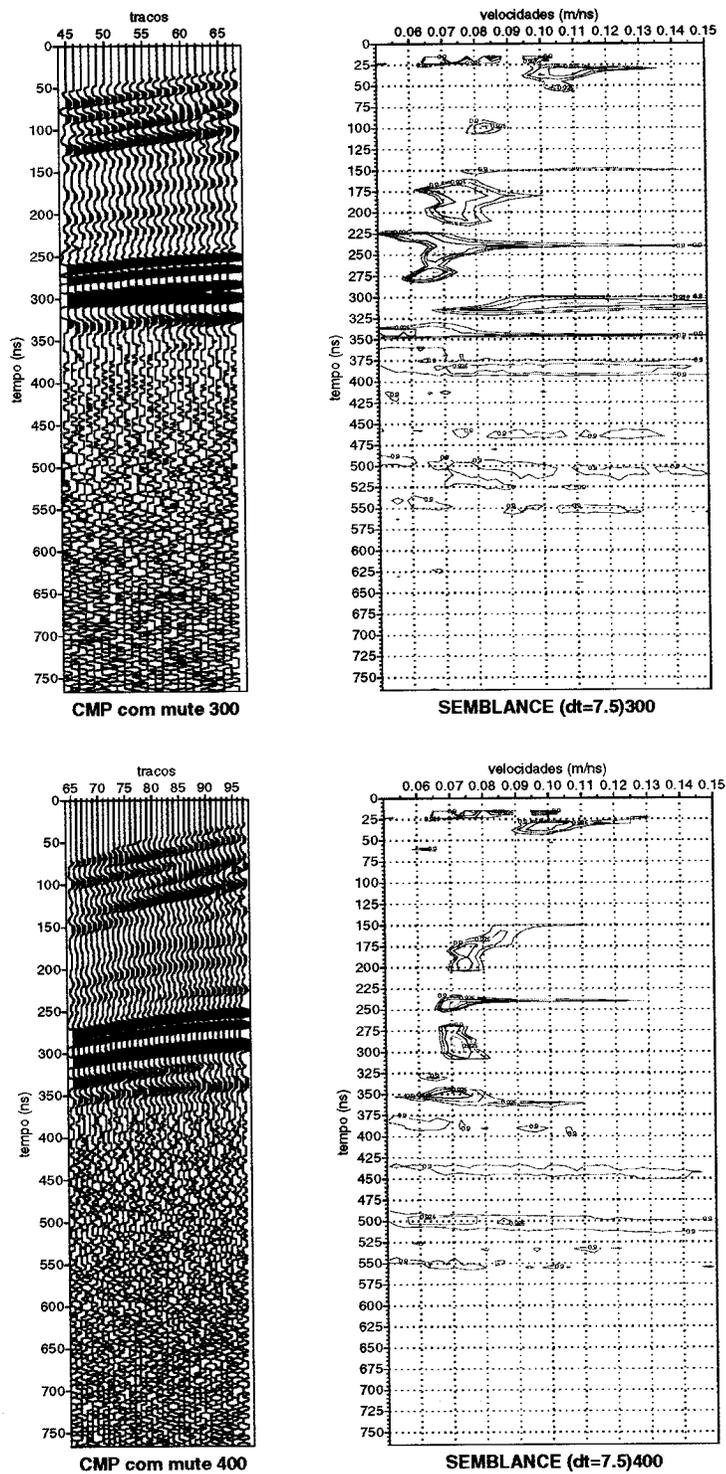


Figura 5.6: Famílias *CMP* com *mute* e ganhos e a análise de velocidades correspondente, para as posições 300 (acima) e 400 (abaixo).

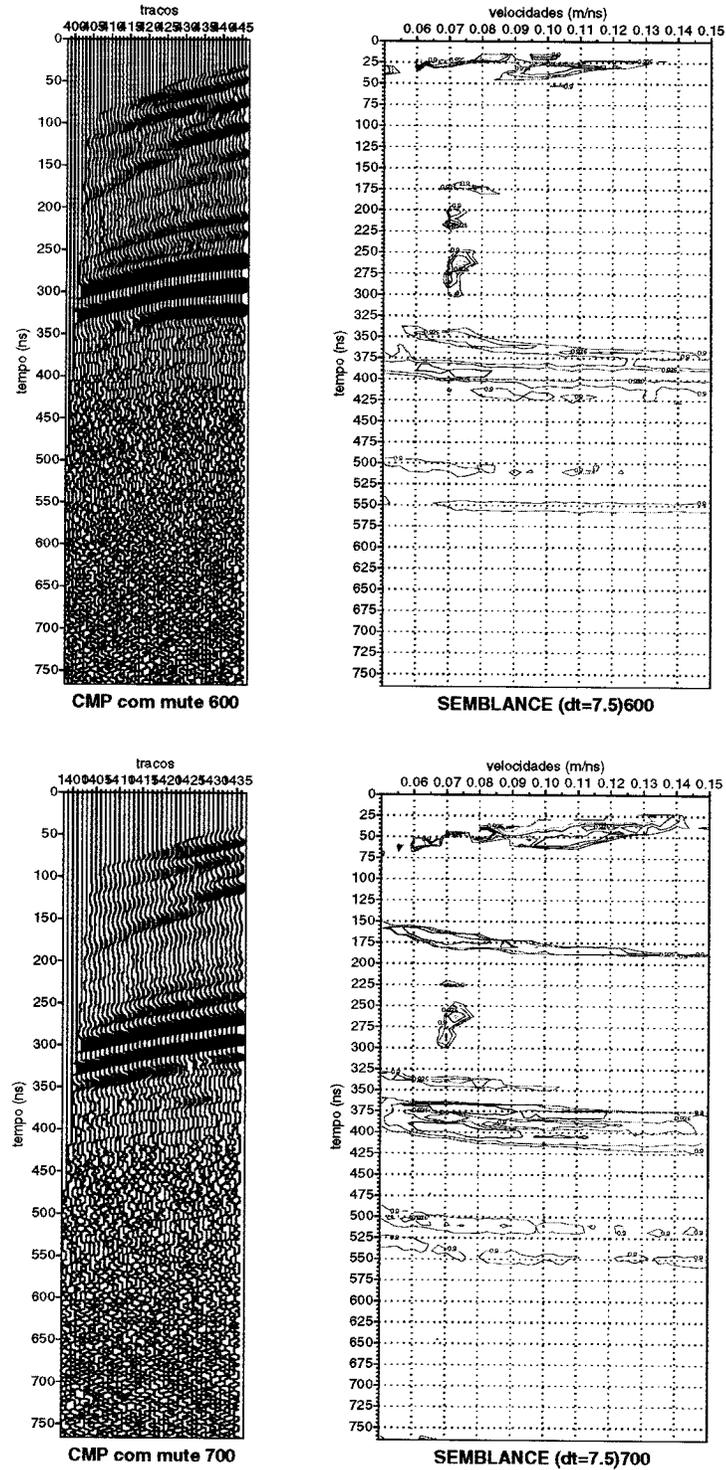


Figura 5.7: Famílias *CMP* com *mute* e ganho e a análise de velocidades correspondente, para as posições 600 (acima) e 700 (abaixo).

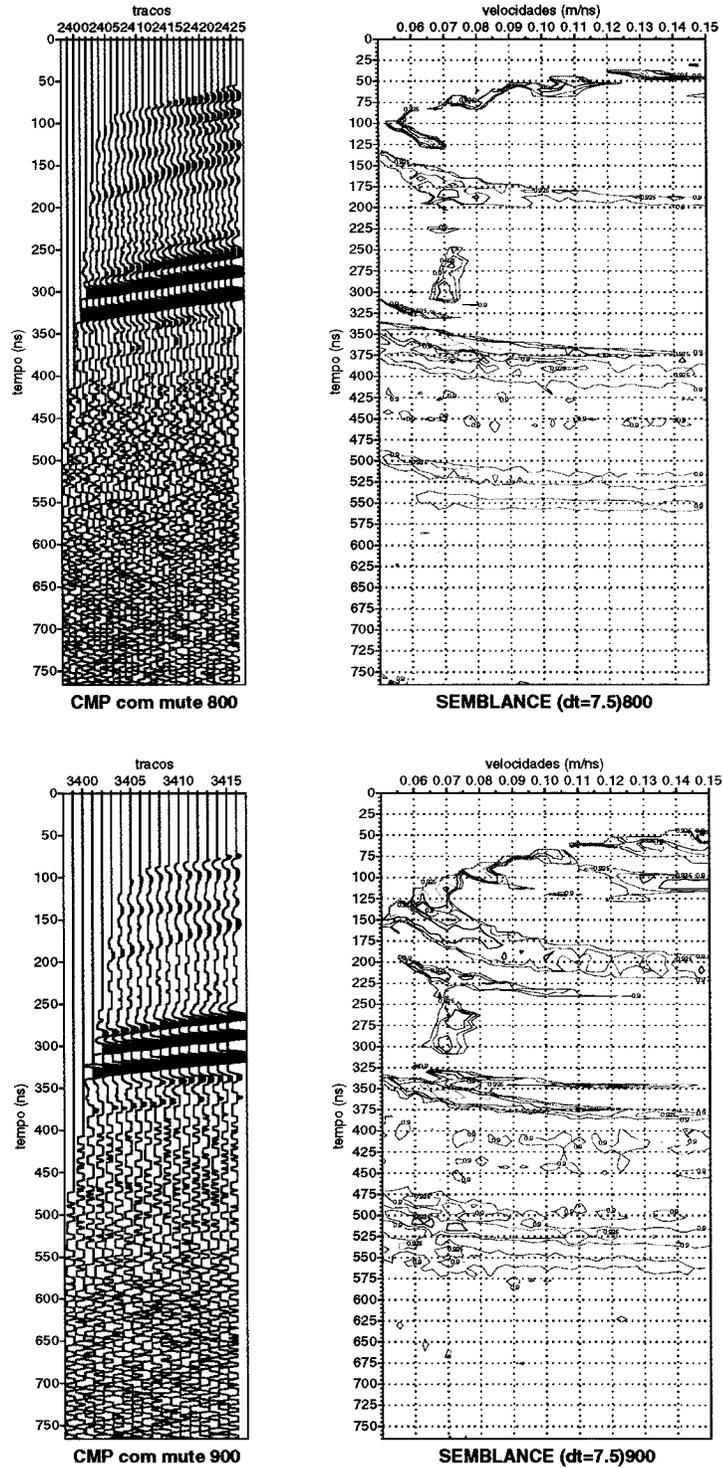


Figura 5.8: Famílias *CMP* com *mute* e ganho, e a análise de velocidades correspondente, para as posições 800 (acima) e 900 (abaixo).

## 5.1.2 Análise das Seções com Afastamento Constante

### 5.1.2.1 Levantamentos nos Arredores da Lagoa do Abaete

O imageamento subterrâneo do entorno da Lagoa do Abaeté constitui um objetivo-chave para a compreensão de sua hidrodinâmica. A simples observação da topografia neste entorno fornece indícios de que um horizonte relativamente impermeável se apresenta raso neste local (figura 5.9).

Por motivos de organização, vamos subdividir o entorno da Lagoa em três setores:

- morro do Mirante, ocupando a porção norte e dividindo o braço leste do braço oeste da Lagoa;
- flanco sul-sudoeste, nas proximidades da praça do centro de convivência e
- morro do Vigia, na porção sul

**Morro do Mirante** Uma série de linhas foram levantadas, principalmente na “língua” de areia às margens da Lagoa, demonstrando estruturas até aproximadamente 15 metros de profundidade (figura 5.10). Esses perfís revelam ao menos três níveis característicos, os quais foram interpretados como areia seca, areia saturada e embasamento cristalino alterado ou manto intempérico. As figuras 5.11, 5.12 e 5.13 ilustram os perfís adquiridos, alguns deles migrados.

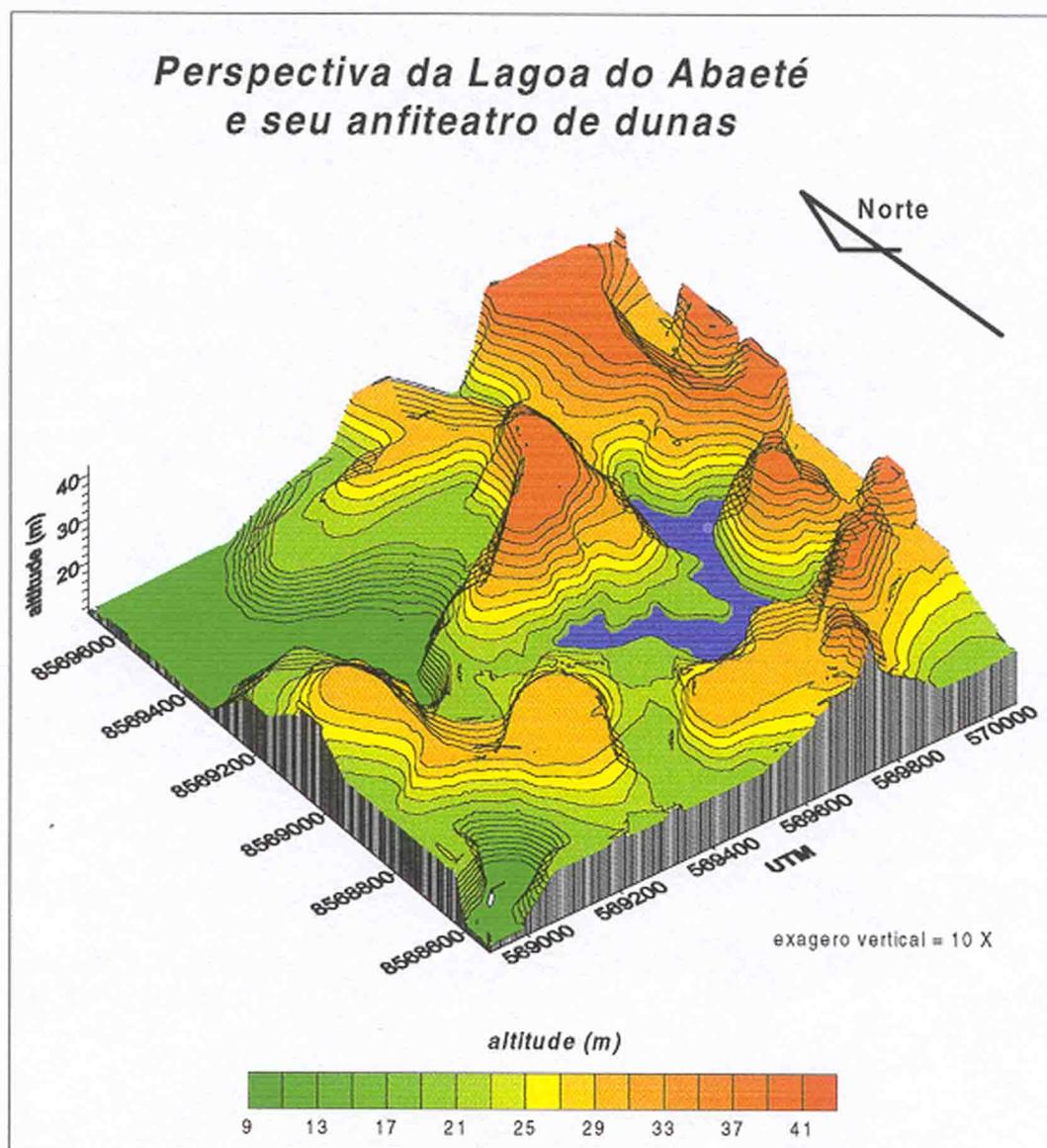


Figura 5.9: Perspectiva da Lagoa do Abaeté e seu anfiteatro de dunas, revelando regiões circunvizinhas mais baixas que o nível de seu espelho d'água. Essa informação mostra que o morro do Mirante deve conter um nível impermeável em seu interior.

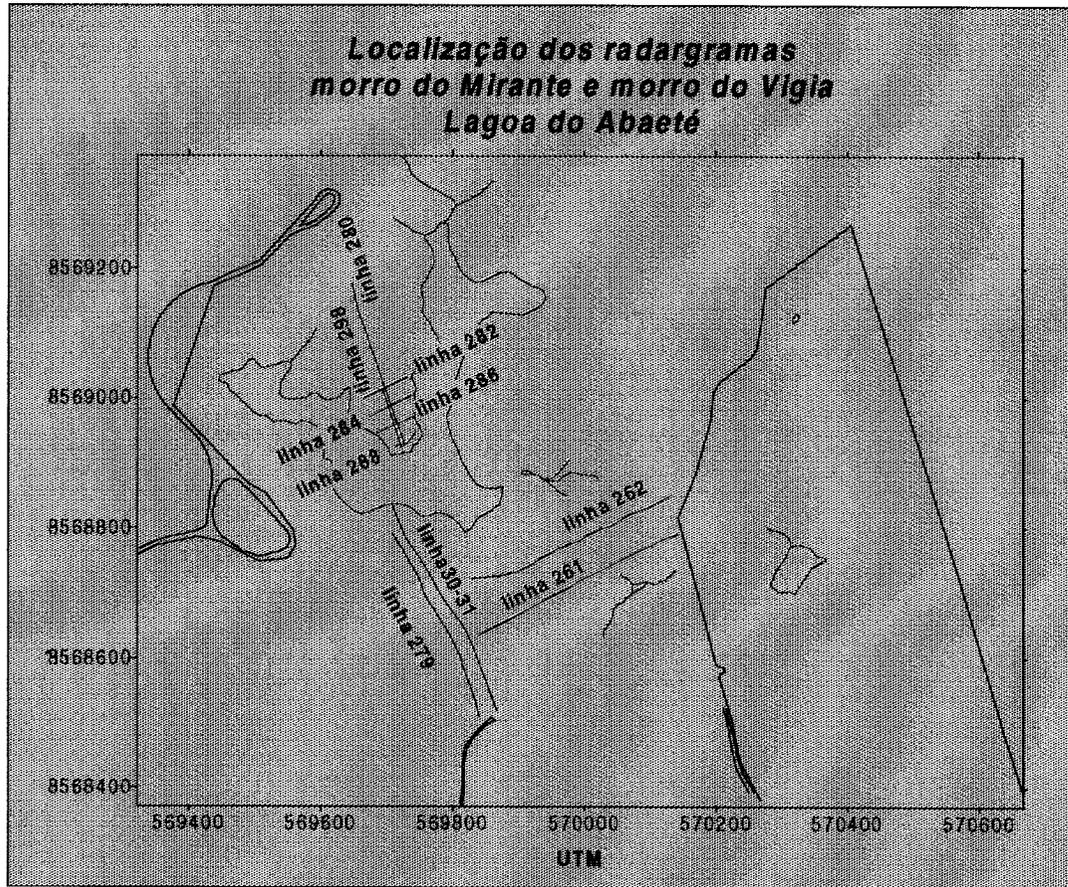


Figura 5.10: Localização dos radargramas adquiridos no morro do Mirante e morro do Vigia.

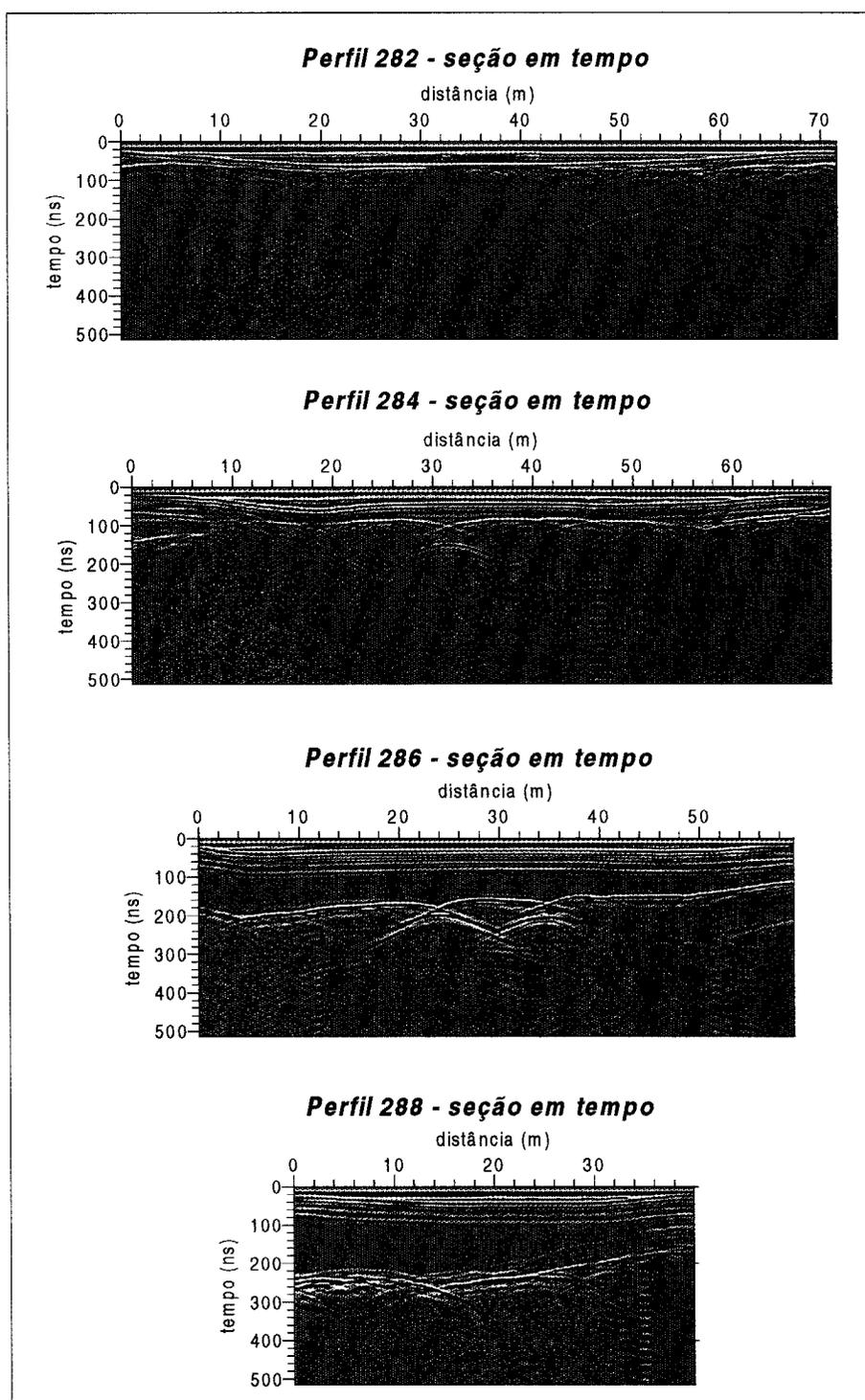


Figura 5.11: Radargramas transversais à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Percebe-se claramente a presença de um foco enterrado nos perfís 284 e 286, acusados pela imagem de “gravata borboleta”.

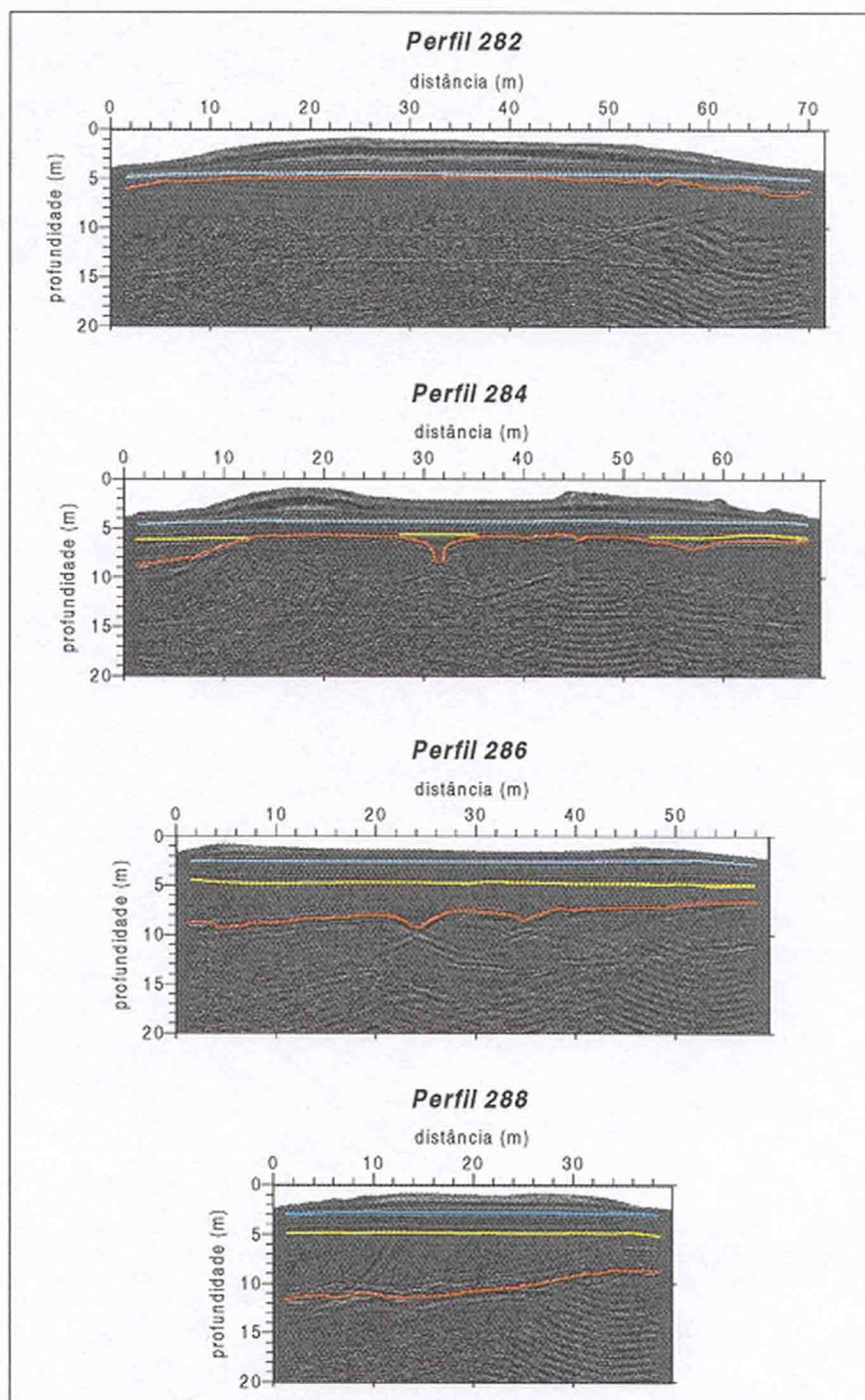


Figura 5.12: Radargramas migrados transversais à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Migração por diferenças finitas com correção topográfica simultânea (Botelho & Pestana, 1996). Em vermelho, topo do embasamento ou manto de alteração (?); em amarelo, horizonte interno do corpo de areia e em azul, nível estático

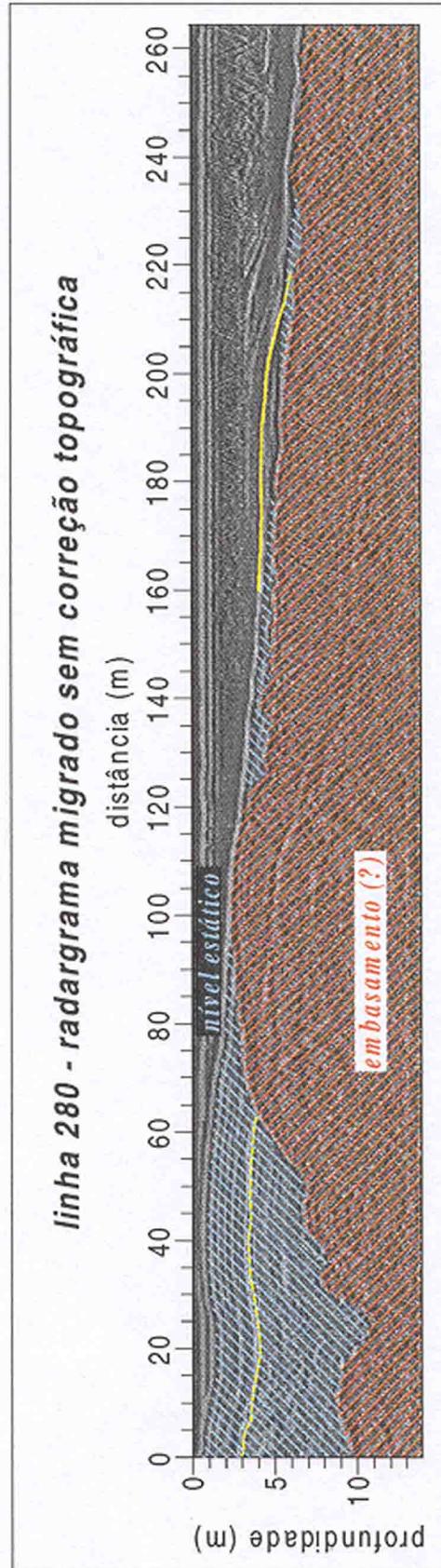


Figura 5.13: Radargrama migrado longitudinal à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Migração utilizando o algoritmo *split-step* (Freire, 1986). Em vermelho, embasamento ou manto de alteração (?); em amarelo, horizontes internos do corpo de areia e em azul, zona saturada. Notar a falsa impressão de “descida” do nível freático, por efeito não compensado da ascensão topográfica.

**Flanco sul-sudoeste (centro de convivência)** Um total de 6 perfís foram adquiridos na margem da Lagoa do Abaeté, próxima à praça do centro de convivência (figura 5.14): três aproximadamente perpendiculares à linha de margem e outros três aproximadamente paralelos. Eles acusam a presença dos mesmos horizontes imageados no morro do Mirante. Foi utilizado o algoritmo *split-step*, com as velocidades obtidas com os *VELANs* realizado no morro do Mirante.

Nota-se que o refletor mais profundo, interpretado como topo do embasamento ou do manto de alteração mostra um mergulho suave para sudeste, em uma estrutura acanalada. A falta de correção topográfica, neste dados, resulta novamente na falsa impressão de descida do nível d'água nos perfís 359, 360 e 361.

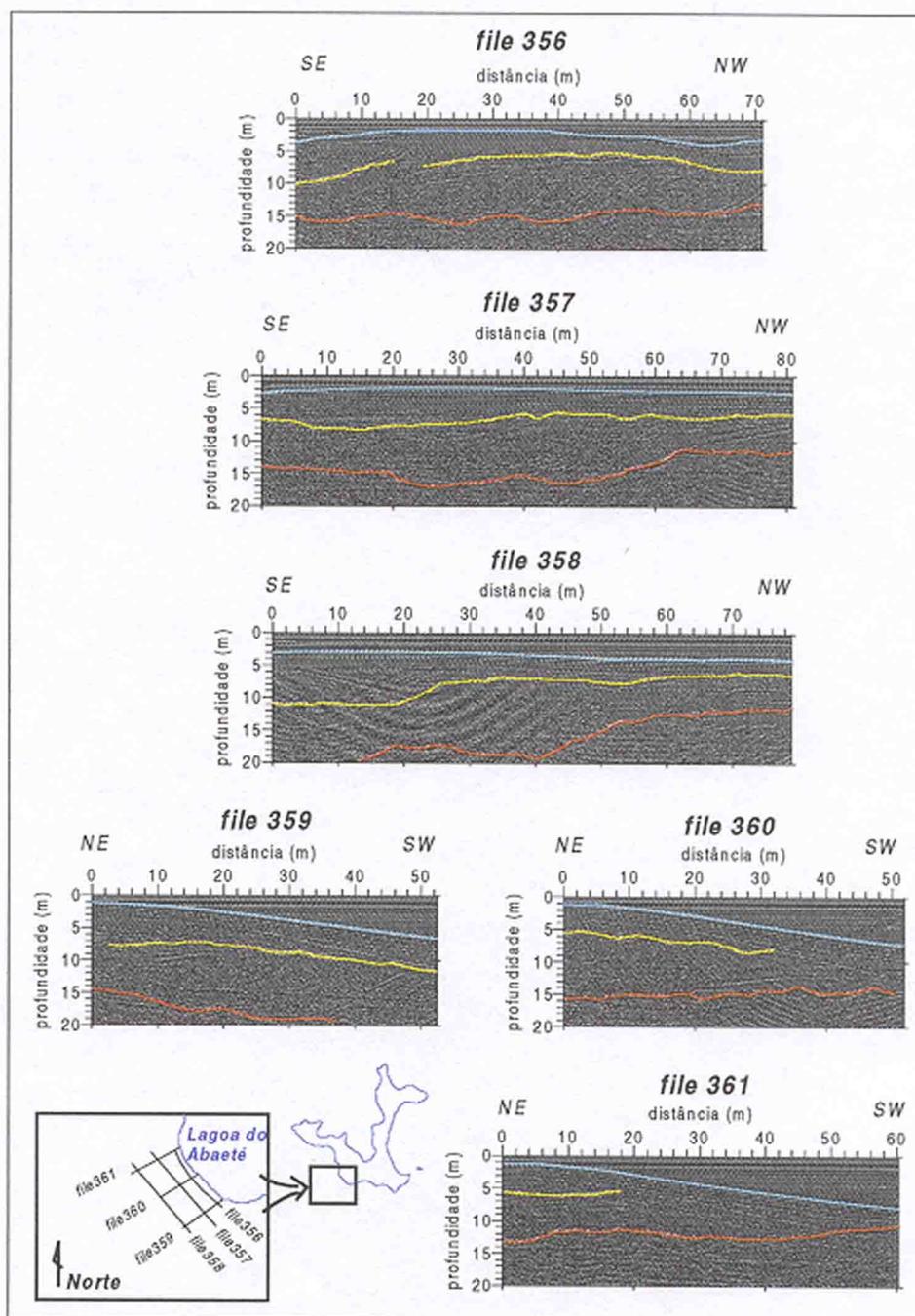


Figura 5.14: Perfis de radar executados no flanco sul-sudoeste da Lagoa do Abaeté (vide canto inferior esquerdo), demonstrando três níveis: (i) embasamento ou manto de alteração (?); (ii) corpo arenoso saturado, com estratificações internas e (iii) zona não saturada. Radargramas migrados com o algoritmo *split-step*, sem correção topográfica.

**Morro do Vigia** O morro do Vigia contempla as cristas de dunas que compõem o flanco sul da Lagoa do Abaeté (vide figura 2.4). Essas dunas apresentam seu lado mais íngreme voltado para o lago, com uma diferença de cota de aproximadamente 14 m para 55 m na horizontal. Essa configuração topográfica diminui a penetração do sinal abaixo do nível estático, por dois motivos: (i) na face íngreme, devido ao ângulo raso de incidência do sinal de radar sobre a interface do freático e (ii) no topo, devido ao espalhamento geométrico em função da profundidade do freático. Ambos os fatores implicam na diminuição da energia da onda propagante abaixo do nível estático, impossibilitando o imageamento de níveis mais profundos.

A figura 5.15 ilustra bem o problema acima exposto, em uma composição com um radargrama executado no morro do Mirante. Apesar da linha 31 não fornecer nenhuma indicação clara de refletores mais profundos, a sua continuação para sul (linha 30) mostra algum indício, o qual foi interpretado como rochas cristalina ou seu manto de alteração. Esses 2 perfís foram adquiridos em separado por motivos práticos de campo, mas representam um único alinhamento, conforme pode ser visto na figura 5.16.

Reforçando estes indícios, temos os perfís 261 e 262 (figura 5.17). Deve-se ter atenção para o fato de que eles foram adquiridos em linhas paralelas, mas em sentidos opostos. Nota-se, ainda que os supostos refletores apresentam uma configuração bastante ondulante e descontínua em todos os três radargramas (30-31, 261 e 262). Trata-se provavelmente do embasamento cristalino ou seu manto de alteração.

Talvez o de mais difícil interpretação seja o perfil 279 (figura 5.18). Nele, pode-se notar uma grande fonte de ambigüidade no método do radar, que não encontra analogia na sísmica: a fonte emissora está imersa no ar e as ondas eletromagnéticas no ar são muito menos atenuadas que em subsuperfície. Este fato pode introduzir no radargrama reflexões laterais espúrias com uma grande intensidade, confundindo a interpretação. Observe os dois eventos assinalados com as letras "A" e "B". Com alguma confiança, podemos supor que o evento "B" se trata de reflexão lateral, por estar atravessado sistematicamente pelas mega-estratificações cruzadas tanto na seção em tempo (o que não é fato conclusivo) como na seção migrada. Já o evento "A" não permite uma avaliação tão segura, até mesmo pela coerência com a estruturação geral da duna.

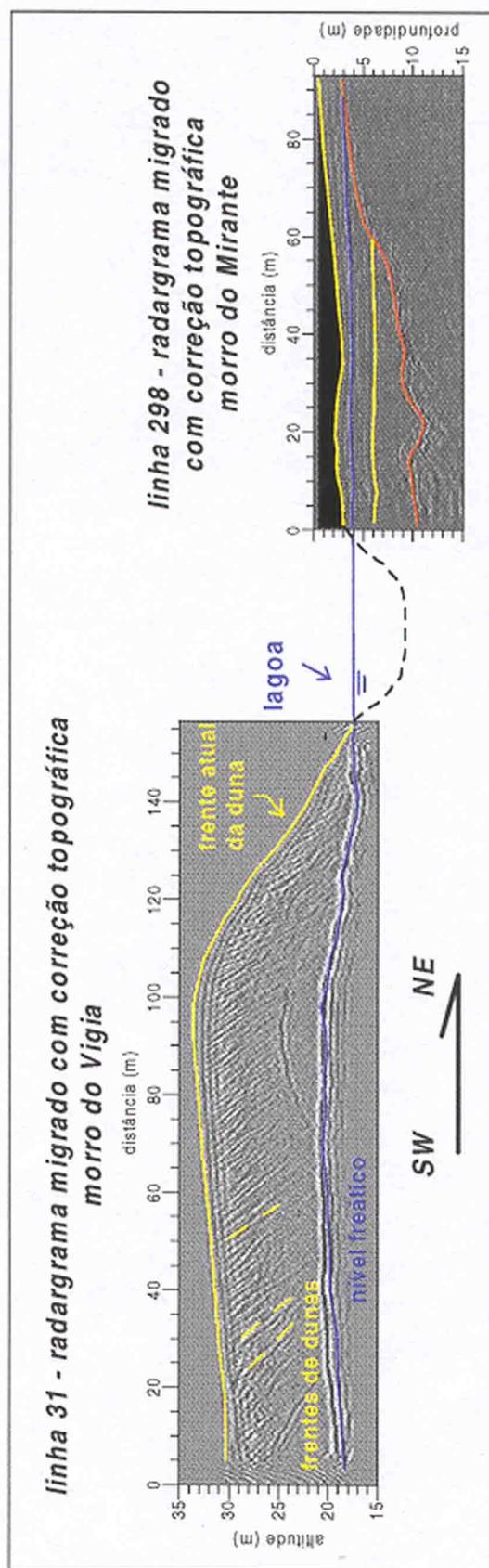


Figura 5.15: Radargramas migrados transversais à língua de areia do morro do Mirante, nas margens da Lagoa do Abaeté. Migração com o algoritmo *split-step* (perfil 31) e por diferenças finitas (perfil 298) com correção topográfica simultânea (Botelho & Pestana, 1996). Em vermelho, topo do embasamento ou manto de alteração (?); em amarelo, horizonte interno do corpo de areia, superfície topográfica atual e paleofrentes de duna; em azul, nível estático.

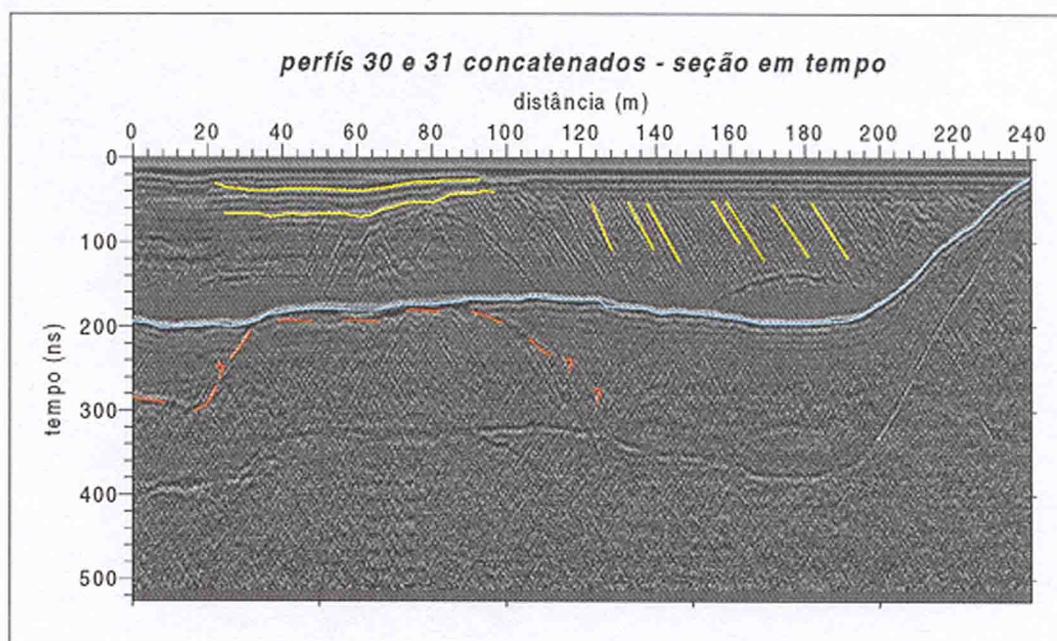


Figura 5.16: Composição dos radargramas 30 e 31, em tempo, demonstrando claramente o topo do freático (azul), paleofrentes de dunas e outras estruturas no corpo arenoso (amarelo) e um horizonte mais profundo, na porção sul (início do perfil), o qual pode representar o topo do embasamento ou seu manto de alteração. Percebe-se o efeito reverso da topografia sobre os refletores, aparentando uma subida do nível estático na faixa de descida da frente de duna (confrontar com a figura 5.15).

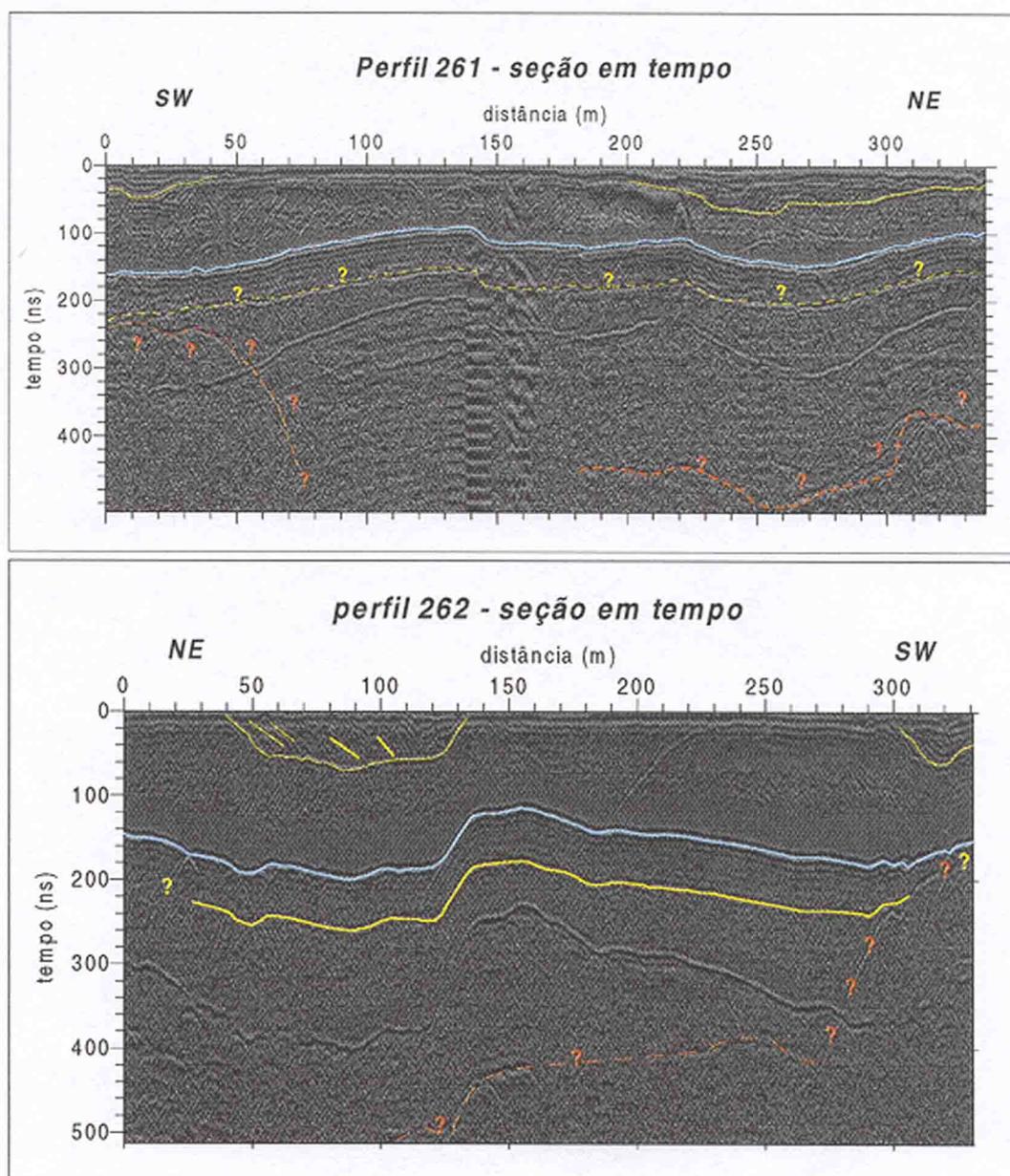


Figura 5.17: Perfís de radar executados no morro do Vigia, em posição aproximadamente perpendicular aos radargramas 279 e 30-31. Nota-se a persistência do refletor abaixo do nível estático também nestes perfís e algumas estruturas internas do corpo arenoso. Há também indícios de um refletor mais profundo, provavelmente o embasamento cristalino ou seu manto de alteração (em vermelho).

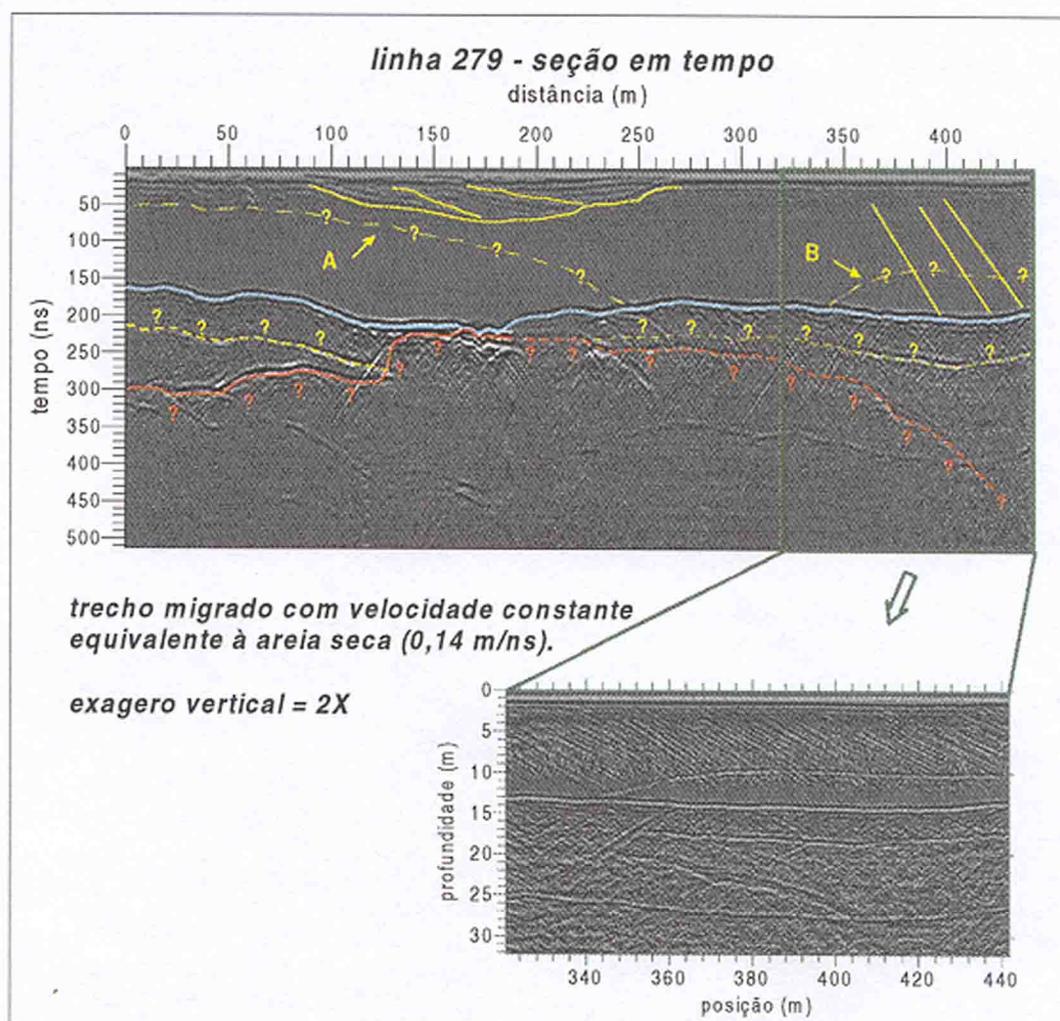


Figura 5.18: Seção 279, adquirida no topo do morro do Vigia e paralelamente aos radargramas 30-31. Em destaque o nível freático (azul), algumas estruturas no corpo arenoso (mega-estratificações cruzadas) e uma possível interface com o embasamento cristalino ou seu manto de alteração. Nota-se dois eventos (“A” e “B”) suspeitadamente advindos de reflexões laterais. Entretanto, apenas o evento assinalado com a letra “B” pode ser confirmado como reflexão espúria lateral, como pode ser demonstrado com a migração.

### 5.1.2.2 Área do Hotel Sofitel e Adjacências

O Hotel Sofitel Quatro Rodas está situado à sudeste da Lagoa do Abaeté, em uma área de  $375.320m^2$  (figuras 5.19 e 2.1). Neste terreno instalou-se um campo de golfe, com a utilização de algumas lagoas locais e criação de outras, além da implantação de um extenso gramado (figura 4.7). Quatro radargramas extensos foram adquiridos, sendo três deles no campo de golfe (linhas 455, 456-458 e 600). O outro (linha 34) foi adquirido na rua de acesso ao Hotel (rua da Passargada), com início próximo a entrada de serviço deste e final no alto da duna.

Os perfis 600 (figura 5.20) e 456-458 (figura 5.21) mostram-se coerentes, assinalando eventos idênticos. Ao menos três níveis característicos são notados: (i) um refletor mais profundo, mergulhando suavemente para norte, (ii) um intermediário, horizontalizado e (iii) o mais raso, marcando o nível estático (como pode ser percebido pela análise de velocidades).

A linha 455 (figura 5.22) também mostra ao menos três níveis característicos, com o refletor mais profundo bastante ondulado. Durante a aquisição deste radargrama, pode-se observar o N.E. aflorante em um pequeno trecho, o que indica que este refletor é, em um certo trecho, confundido com o sinal direto.

O radargrama 34 (figura 5.23) mostra um interessante efeito de variação de amplitudes devido a presença de aterro argiloso, na parte baixa (inicial) do perfil. Este exemplo demonstra o quão atenuante pode ser uma camada argilosa na propagação do pulso eletromagnético.

Deve ser salientado que em nenhum destes radargramas foi corrigido o efeito de topografia.

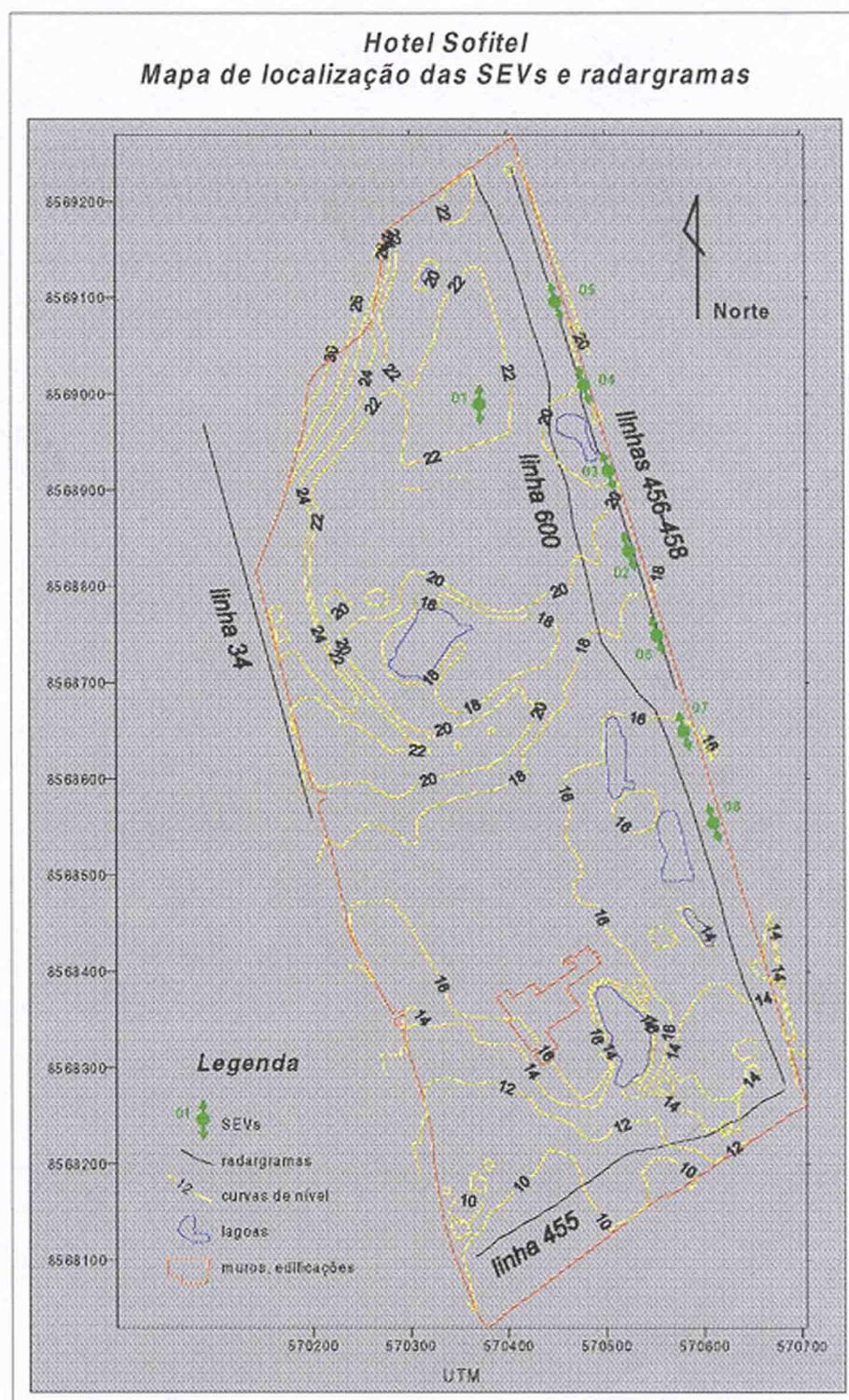


Figura 5.19: Planta baixa das dependências do Hotel Sofitel e localização dos levantamentos geofísicos

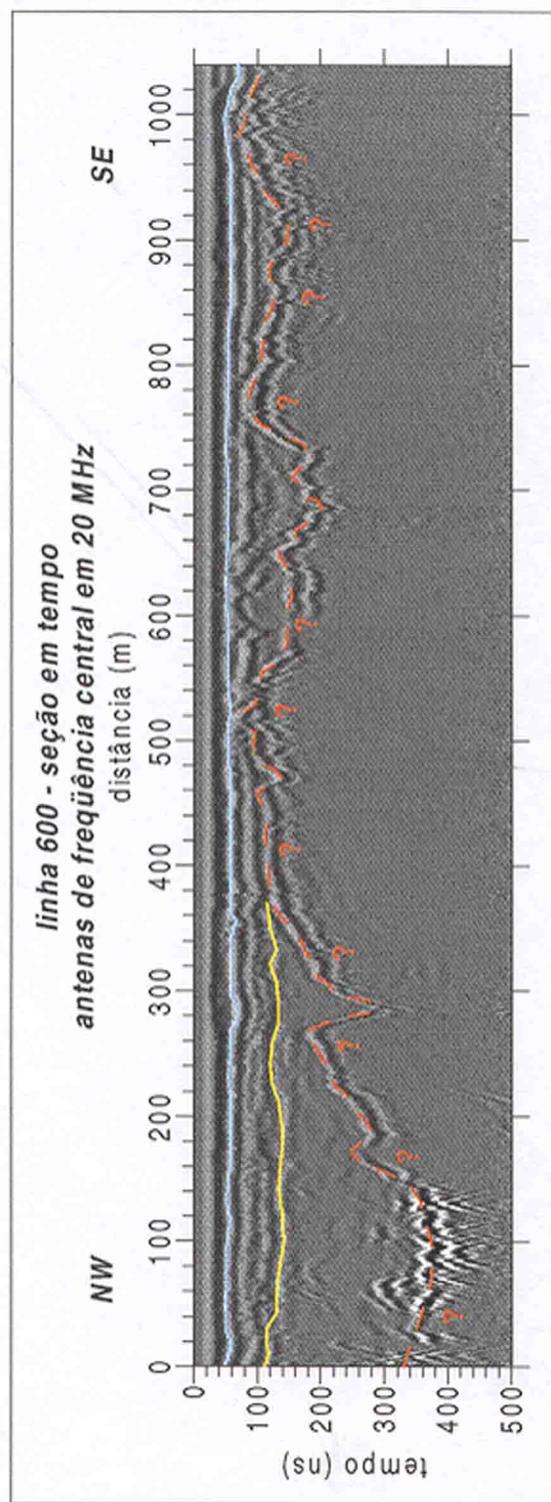


Figura 5.20: Radargrama 600, adquirido com antenas de 32MHz. Pode-se perceber o refletor mais profundo suavemente ondulado (embasamento, manto de alteração ou nível de aterro?), com mergulho baixo para norte. O uso desta frequência mais baixa diminui a resolução dos refletores mais rasos, dificultando a identificação do nível freático, que se encontra subafiorante no local.

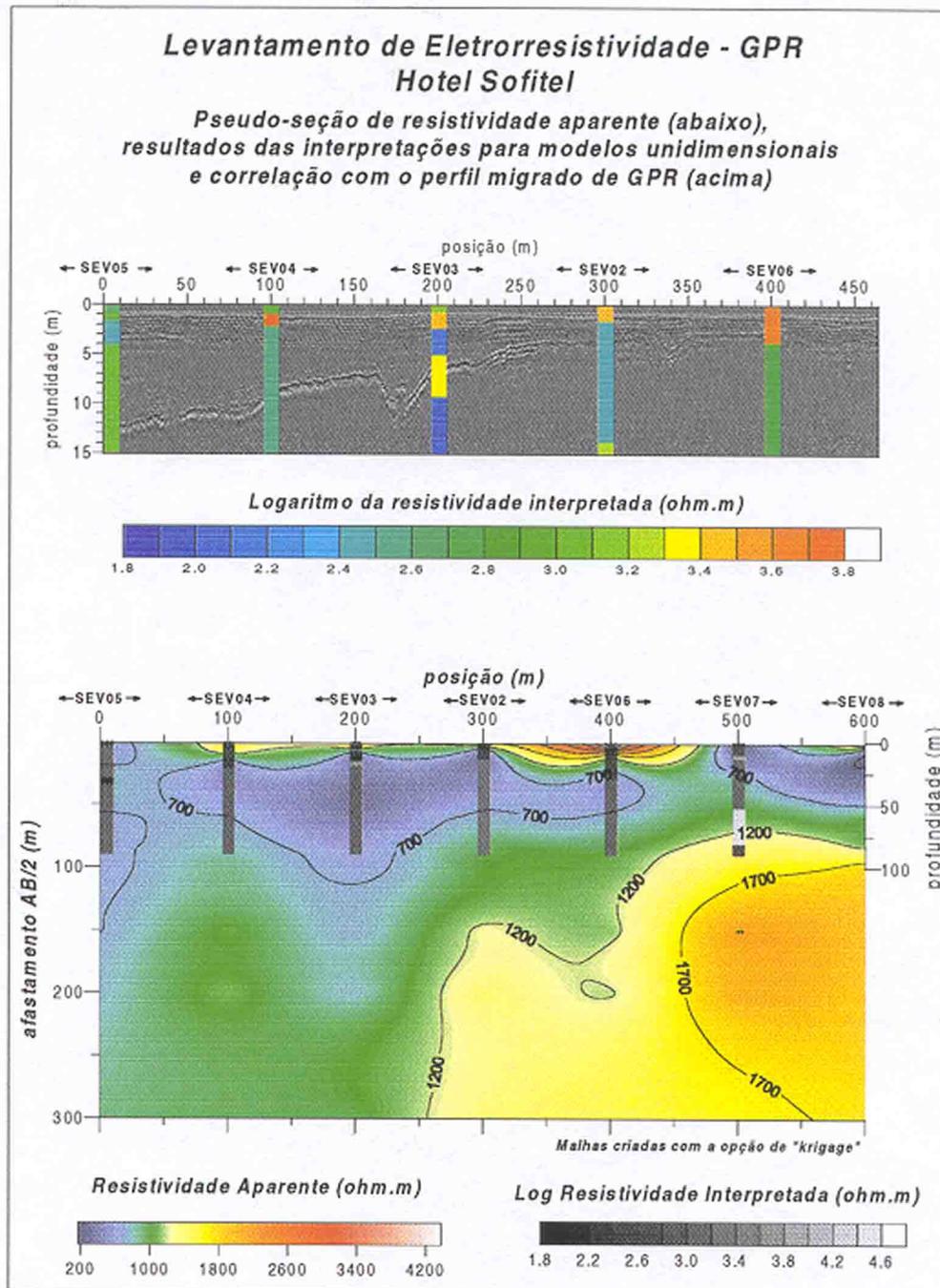


Figura 5.21: Radargrama 456-458 migrado com velocidades variáveis (método *split-step*), adquirido com antenas de 80MHz e pseudo-seção de resistividade elétrica (vide 4.2), com inversão das resistividades considerando modelos unidimensionais para cada sondagem. Salienta-se, ainda, que os resultados das inversões unidimensionais foram truncados na composição com a imagem de radar, considerando a máxima profundidade de migração

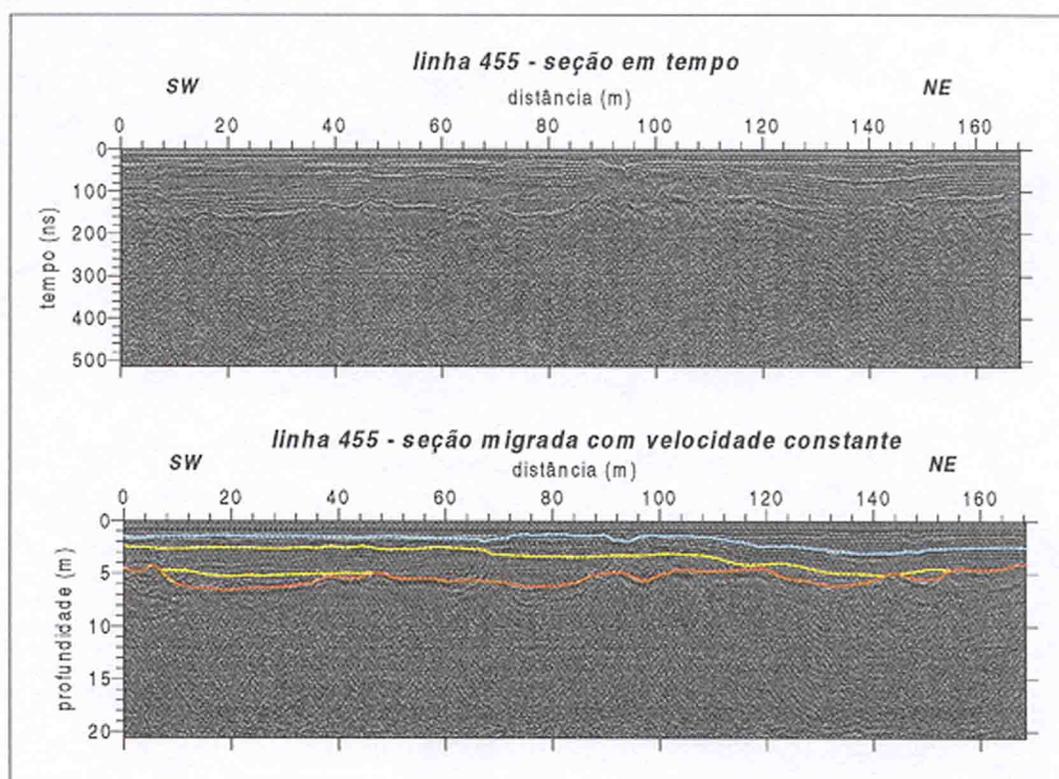


Figura 5.22: Linha 455, adquirido com antenas de 80MHz. Nota-se ao menos três níveis característicos, com o freático sub-aflorante na porção central. Acima, seção em tempo e abaixo, migração com velocidade constante (*phase-shift*).

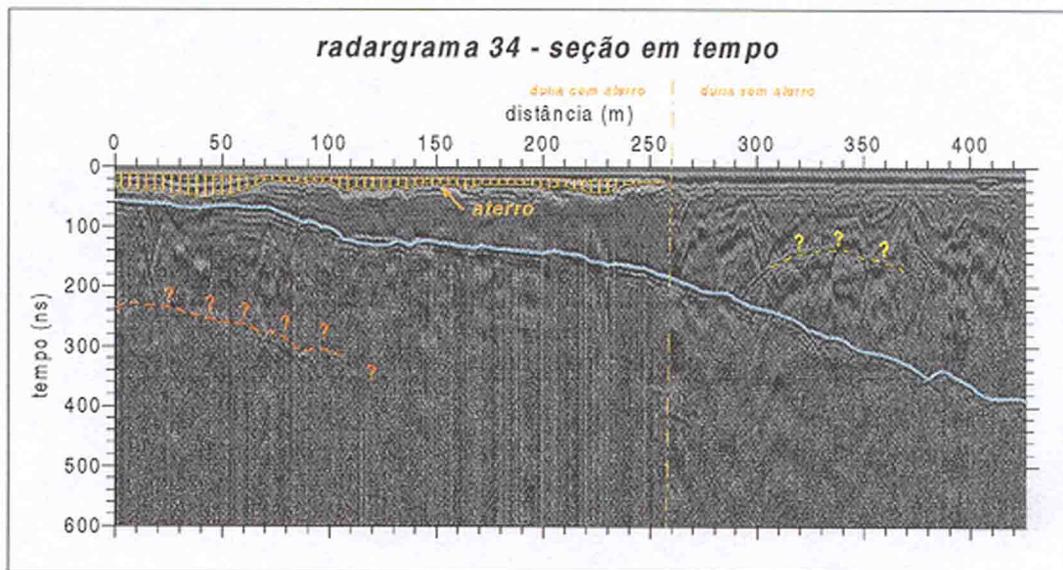


Figura 5.23: Radargrama 34. Nota-se o efeito da ascensão da topografia na falsa impressão de descida no nível freático. Percebe-se, ainda, o efeito absorvido da camada argilosa que compõem um pequeno trecho de aterro, no início do perfil.

## 5.2 Análise das Sondagens Elétricas e Pseudo-Seções de Resistividade e Polarização Induzida

Os gráficos da figura 5.24 ilustram três sondagens elétricas conduzidas na área. A primeira (acima), realizada na praia em frente ao Hotel Quatro Rodas, se mostra “bem comportada”, com uma boa qualidade dos dados. A segunda (centro), realizada no passeio em frente ao Hotel, denota uma qualidade inferior dos dados, provavelmente por efeitos laterais devido a tubulações, aterros, etc,. A terceira (abaixo), executada a poucos metros da beira da Lagoa do Abaeté, se mostrou absolutamente inconsistente, sendo abandonada antes mesmo de seu término. Este exemplo ilustra claramente as dificuldades enfrentadas na condução destes serviços quando sobre as dunas. Deve-se reparar, também, na variação da faixa de resistividades entre estas sondagens.

Contudo, algumas sondagens elétricas no campo de dunas mostraram resultados satisfatórios, fora da área de estudo. O uso de um equipamento mais potente (recentemente adquirido pelo CPGG/UFBA), demonstra ser viável, com as devidas precauções, campanhas de eletrorresistividade nestes terrenos arenosos de dunas.

Uma seqüência de 7 sondagens elétricas verticais tipo schlumberger, com seus centros e expansões contidos em um mesmo alinhamento, foi conduzida no campo de golfe do Hotel Sofitel (figura 5.19). Simultaneamente, realizou-se as medidas de *IP* no domínio do tempo. Essas sondagens foram utilizadas para compor uma pseudo-seção (figura 5.21) e também foram analisadas separadamente, com uma inversão unidimensional (figuras 5.26 e 5.27). Os resultados mostram a influência da variação lateral claramente, inclusive impossibilitando a inversão da SEV08.

Percebe-se uma zona de resistividade baixa na parte mais profunda da porção norte, enquanto na porção sul a resistividade aumenta sensivelmente em profundidade. O confronto com a pseudoseção de *IP* revela uma coerência dos dados (figura 5.28), mostrando perfeitamente estes dois domínios norte X sul. Os valores elevados de polarização induzida na porção norte são indicativos de areias argilosas, com água doce percolando os poros. Na porção sul, tem-se valores intermediários de polarização. Essa queda do efeito de *IP* associada a um aumento da resistividade descarta a possibilidade de maior quantidade de sais no fluido. Pode-se supor, então, a presença de areias mais limpas ou então o embasamento fraturado e com pouca argila.

Nota-se, ainda, a presença de duas estruturas acanaladas, uma de maior porte, cujo fechamento está além do limite norte do hotel, e uma menor, encaixada nesta anterior, com centro

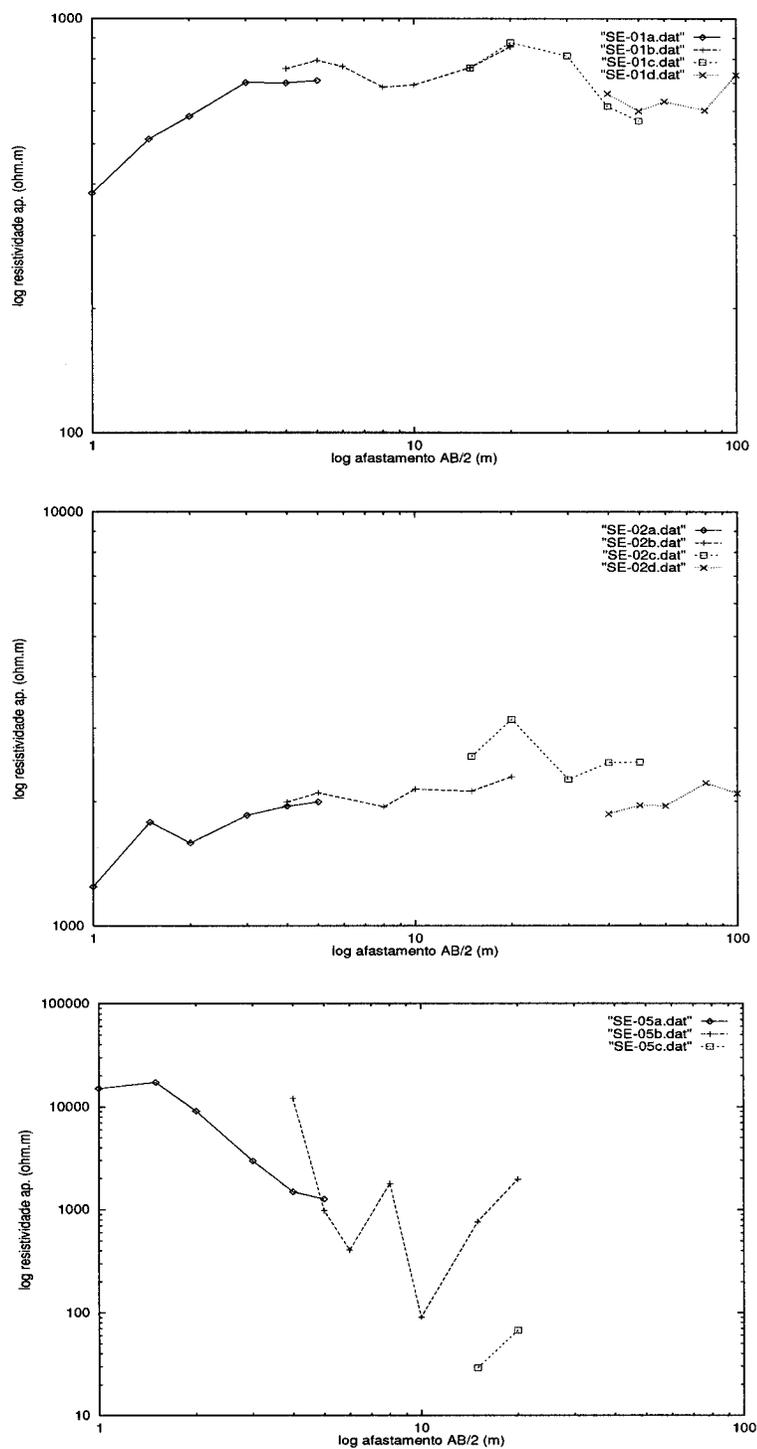


Figura 5.24: Sondagens elétricas conduzidas na área entre a Lagoa do Abaeté e a praia de Itapoan. Os sufixos “a”, “b”, “c” e “d” indicam os afastamentos dos eletrodos de potencial em 0,50 m, 1 m, 5 m e 20 m, respectivamente.

próximo à SEV-02. Esta interpretação concorda com a imagem de radar correspondente. A interpretação geológica esquemática está ilustrada na figura 5.25.

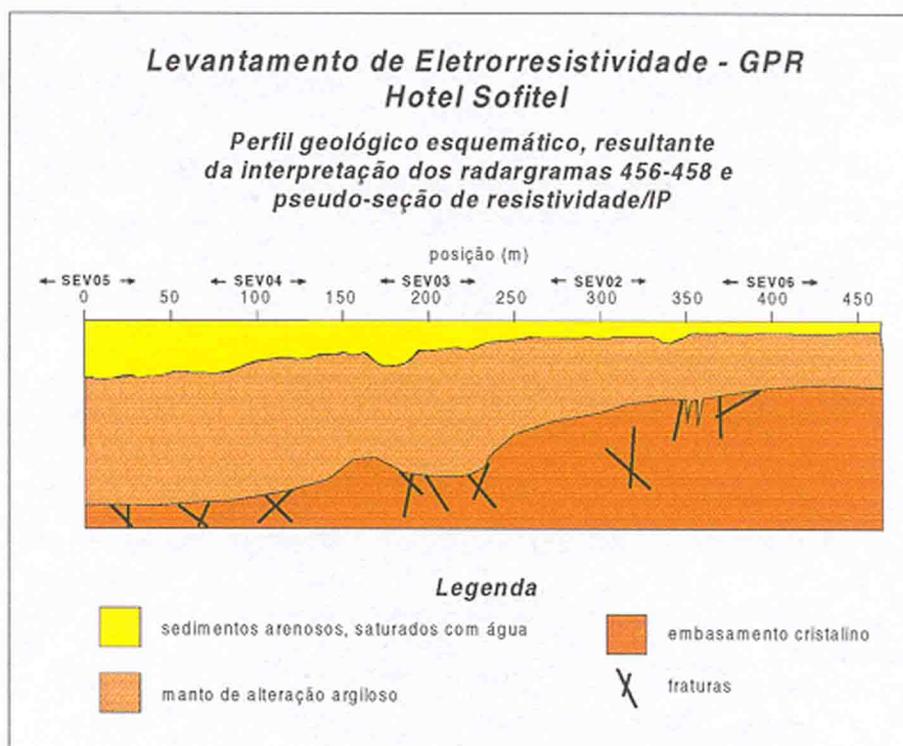


Figura 5.25: Interpretação geológica da pseudo-seção de eletrorresistividade/IP e radargrama correlato.

A sondagem 01, adquirida na porção centro-norte do campo de golfe (figura 5.19), revelou a presença de 5 níveis geoeletricos, como pode ser visto na figura 4.11.

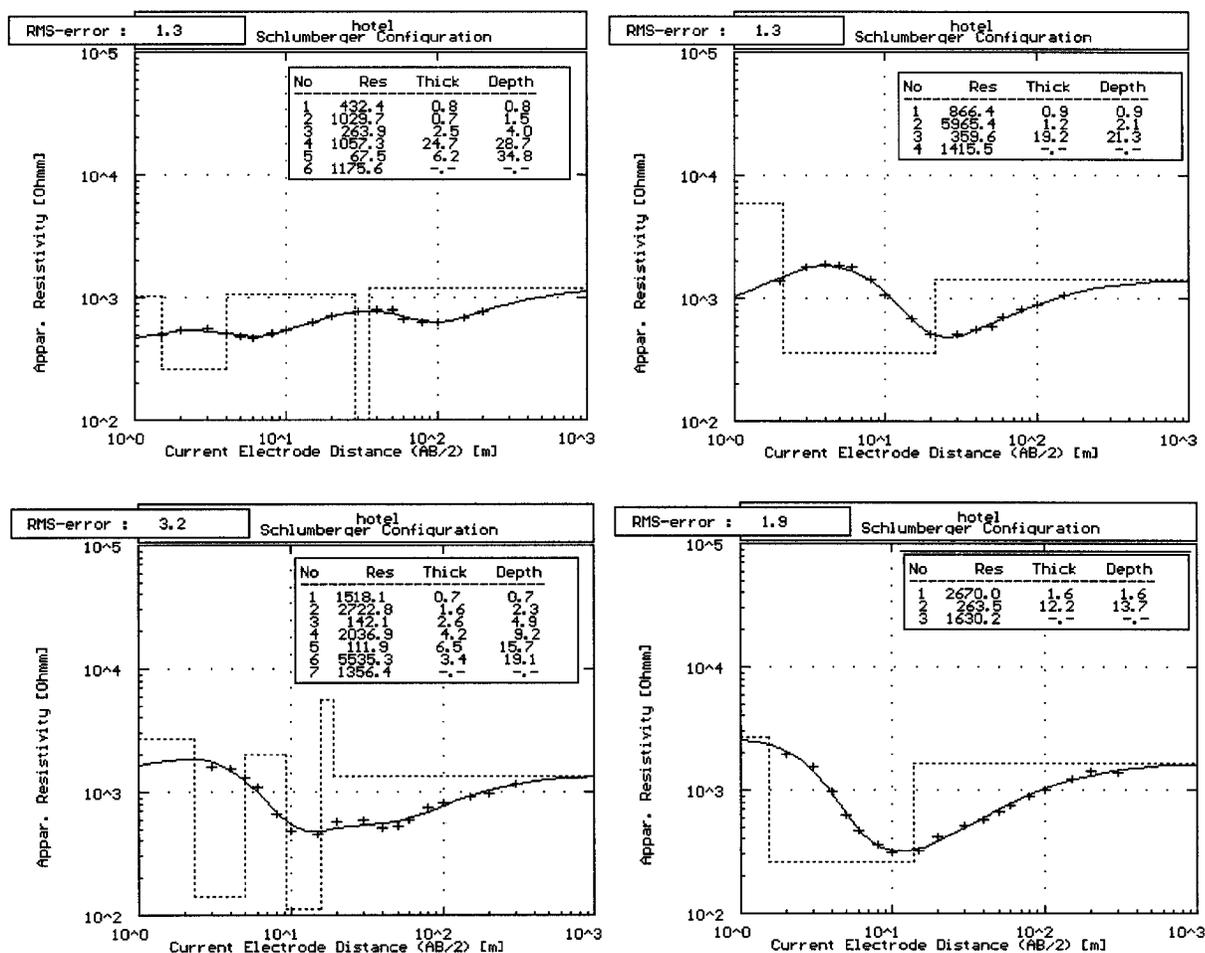


Figura 5.26: Sondagens elétricas verticais adquiridas na área do Hotel Sofitel, com resultados das inversões unidimensionais e indicação do erro quadrático médio. Da esquerda acima para a direita abaixo, SEV05, SEV04, SEV03 e SEV02.

### 5.3 Magnetometria

Conforme pode ser visto no mapa da fig. 5.29, o método mostrou ser capaz de fornecer algumas indicações interessantes. Pode-se destacar uma assimetria em relação ao morro do Mirante e morro do Vigia. No morro do Mirante, além de ocorrer uma maior oscilação do campo (fato percebido inclusive durante a aquisição dos dados), os valores são maiores do que aqueles na parte frontal do morro do Vigia. Essa configuração sugere um grande dipolo norte-sul, tendo como divisor o “braço” oeste da Lagoa.

Esse resultado indicando uma maior proximidade da rocha cristalina no morro do Mirante é ratificado pela observação de rolados de concreção ferruginosa, no flanco leste deste

morro, às margens da Lagoa do Abaeté. Provavelmente, trata-se de material de alteração do embasamento cristalino.

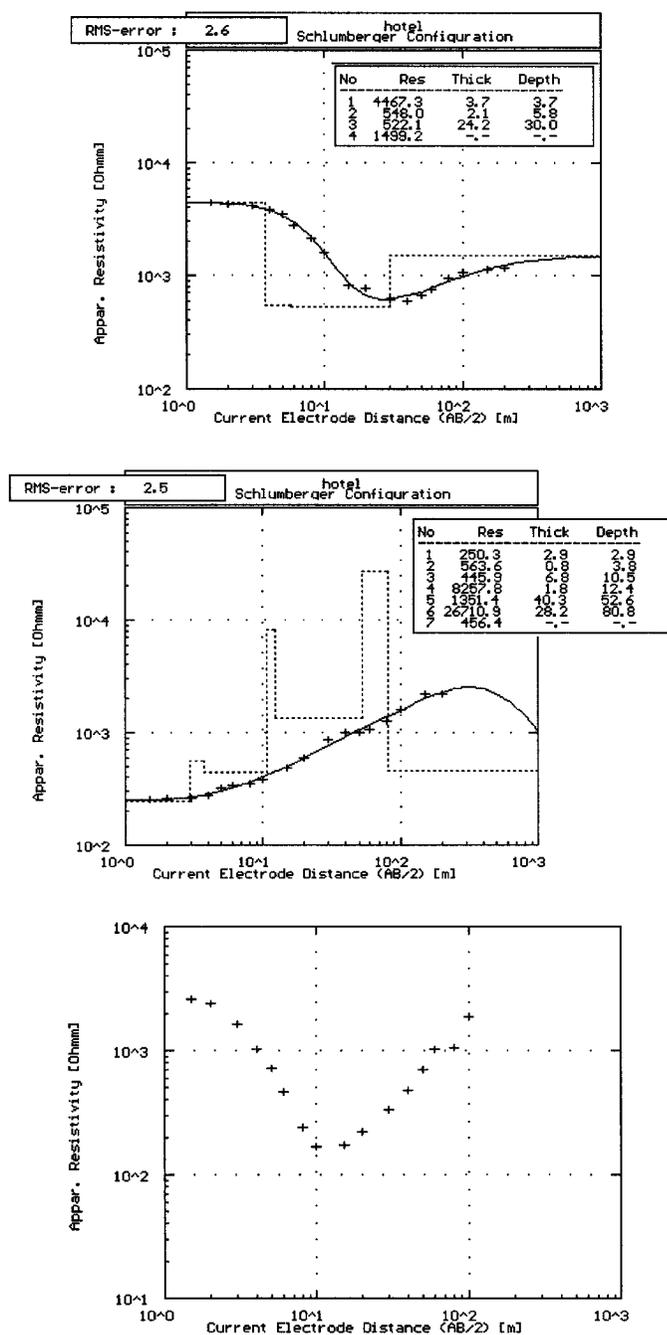


Figura 5.27: Sondagens elétricas verticais adquiridas na área do Hotel Sofitel, com resultados das inversões unidimensionais e indicação do erro quadrático médio. De cima para baixo: SEV06, SEV07 e SEV08. Observa-se que o crescimento da resistividade na porção final da curva da SEV08 se dá com um coeficiente angular maior que 1 ( $45^\circ$ ) na escala log X log, o que ultrapassa o limite de validade para casos unidimensionais.

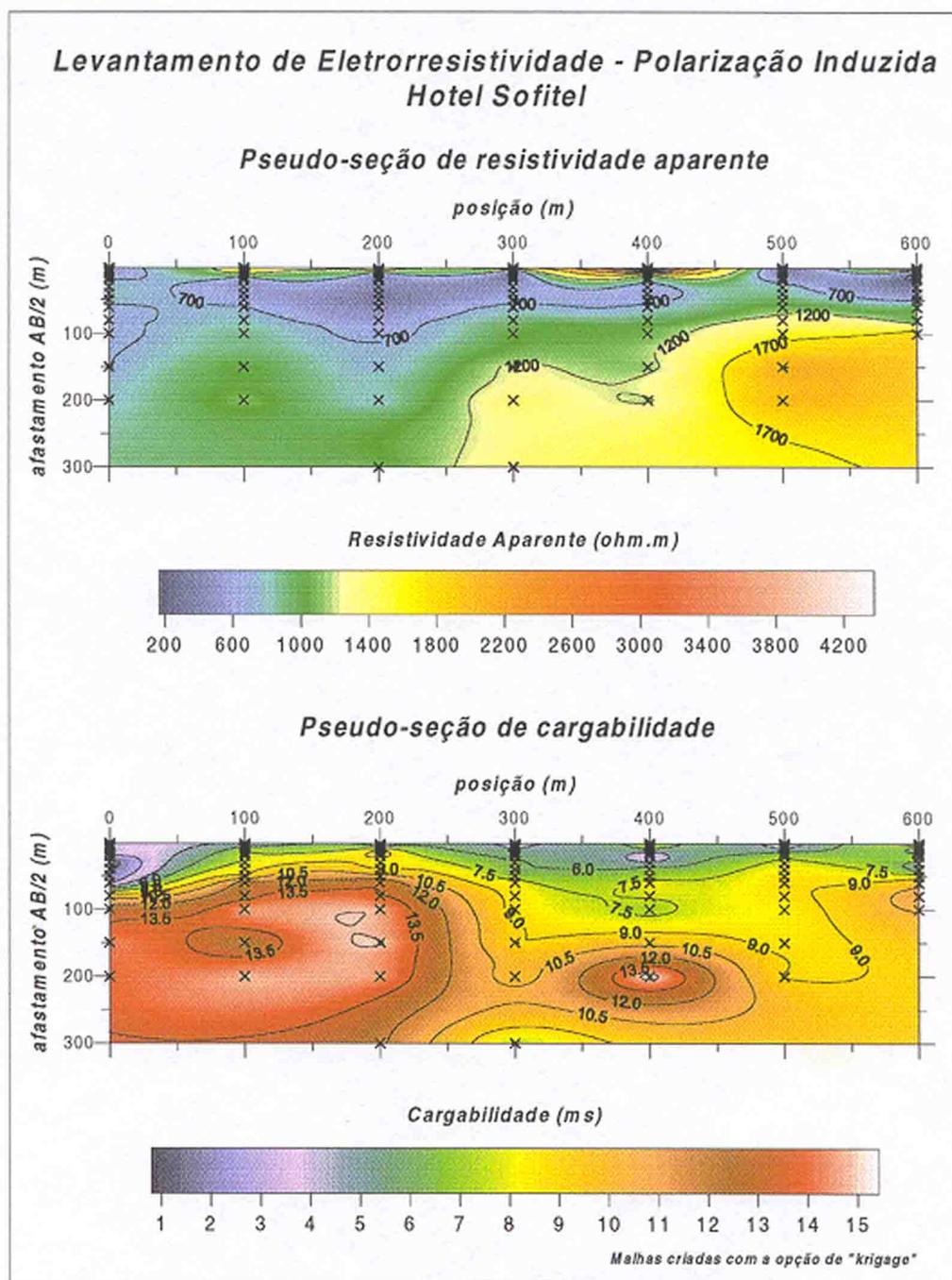


Figura 5.28: Pseudo-seção de resistividade aparente e polarização induzida adquirida no Hotel Sofitel. Observa-se um “baixo” de resistividade na porção norte (início), associado com uma anomalia positiva de  $IP$ . Isso pode ser um indicativo de areias argilosas, com água doce. Na porção sul, percebe-se um “alto” de resistividade, com valores médios de polarização. Trata-se provavelmente do embasamento fraturado mais raso.

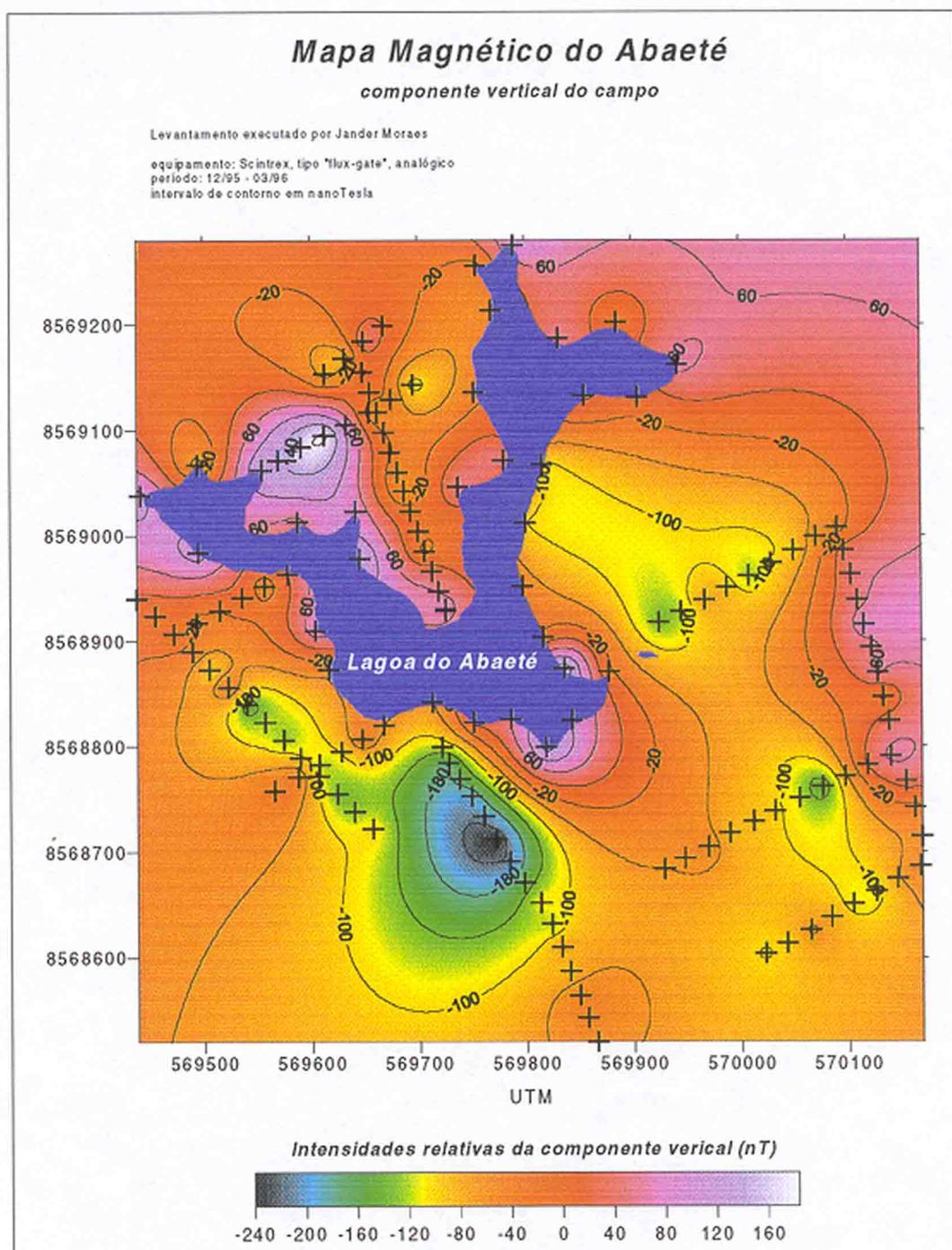


Figura 5.29: Mapa magnético do Abaeté, com mensuração da componente vertical do campo. Nota-se uma assimetria clara entre a porção norte (morro do Mirante) e a porção sul (morro do Vigia).

## CAPÍTULO 6

### Conclusões e Recomendações

A aplicação das técnicas geofísicas na área do Parque das Lagoas e Dunas do Abaeté permitiu, com adequado grau de detalhamento, mapear as principais feições geológicas do local.

O uso do *GPR* forneceu imagens detalhadas dos principais níveis estratigráficos do local, até uma profundidade média de 15 metros, ultrapassando os 20 metros no caso dos topos de dunas. Essa profundidade de exploração foi suficiente para mapear o topo do aquífugo em grande parte da área estudada.

A eletrorresistividade e polarização induzida permitiram caracterizar zoneamentos geoeletrícos, da linha de praia para o continente, além de auxiliar grandemente a interpretação geológica dos refletores mapeados nos perfís de *GPR*. Percebe-se que os sedimentos da praia atual e cordão litorâneo possuem baixas resistividades, os terraços marinhos retrabalhados pelo vento apresentam resistividades intermediárias e as dunas internas apresentam as maiores resistividades, chegando mesmo até  $20k\Omega$  na porção superficial seca. O método de *IP* possibilita avaliar as zonas mais argilosas, indicativas do embasamento alterado ou depósitos fluviolagunares.

A magnetometria, apesar de seu uso restrito no presente trabalho, demonstra ser útil na configuração mais grosseira, qualitativa, da topografia do embasamento cristalino. Um levantamento em escala mais ampla, com mensuração do campo total, está sendo conduzido. Este mapeamento fornece claras indicações de zoneamentos magnéticos, provavelmente correlacionados à oscilações de maior amplitude na topografia subterrânea das rochas cristalinas (Pitombo, comunicação pessoal).

É plausível a utilização os perfís de *GPR* na delimitação do contato não apenas do embasamento (ou seu manto de alteração) com os sedimentos quaternários, como também entre algumas das unidades quaternárias do local. As características morfoscópicas distintas entre as areias das dunas externas e dunas internas provavelmente causam variações de porosidade em seus respectivos depósitos. Esta possível variação de porosidade resulta em conteúdos de

água distintos, o que por sua vez implica em diferentes velocidades de propagação da onda eletromagnética. O emprego combinado de seções de afastamento contínuo com determinações locais do perfil de velocidades intervalares pode fornecer um guia útil na identificação destes horizontes.

No tocante aos aspectos hidrogeológicos, conseguiu-se delimitar zoneamentos de eixos permeáveis e a confirmação de uma suspeitada barreira hidráulica, no morro do Mirante (figura 6.1). Esse mapeamento indica um influxo subterrâneo preferencial de leste-nordeste para a Lagoa e escape pela porção sul-sudoeste. Esse resultado corrobora as observações da topografia (figura 5.9) e de outros elementos, como a existência da antiga represa de olhos-d'água, a sudoeste da Lagoa do Abaeté. Percebe-se, portanto, que a comunidade da invasão de Nova Brasília (norte-noroeste da Lagoa) não pode ser responsabilizada pelo deplecionamento do nível d'água deste lago. As ocupações situadas a sul-sudoeste da Lagoa provavelmente causam um impacto muito maior até mesmo do que o Hotel Sofitel causa, na exploração da água subterrânea através de poços.

O deplecionamento progressivo do espelho d'água da Lagoa do Abaeté advém de muitos fatores. A principal preocupação deve estar voltada para a manutenção da vegetação local. Essa vegetação atua decisivamente na fixação das dunas circundantes do lago, impedindo seu entulhamento por areia. As queimadas que ocorrem destroem não apenas a vegetação como também o delicado equilíbrio na tênue capa de "solo" que a sustenta (Avanzo, 1988), dificultando em muito a sua recomposição. Outro ponto problemático está na elevada impermeabilização superficial da área na porção sul-sudoeste, aliada à extração de água subterrânea por poços. Esses dois fatores combinados resultam no abatimento do nível estático e aumento dos gradientes hidráulicos, "sugando" a água da Lagoa. Contudo, deve-se compreender que as variações do nível d'água da Lagoa acoplam fortemente com as oscilações sazonais e decenais de pluviosidade. Isto não deve ser confundido com o progressivo deplecionamento citado anteriormente.

A hipótese sugerida por Avanzo (1988) para a gênese e evolução da Lagoa do Abaeté foi ratificada em parte pelas informações geofísicas, no que tange à origem fluvial desta. A presença dos paleocanais mapeados (figura 6.1) corroboram a sugestão de vários estágios deste "antigo rio" e deriva de seu leito de leste para oeste. Contudo, é necessário adequar os ciclos de transgressão/regressão marinhas ao esquema já conhecido e ratificado para toda a costa atlântica da Bahia.

Finalmente, recomendamos como etapa complementar deste estudo o estabelecimento de alguns piezômetros na porção sul-sudoeste, e à leste da Lagoa (sobre os eixos de permeabilidade). Estes piezômetros podem também servir para calibração da estratigrafia mapeada

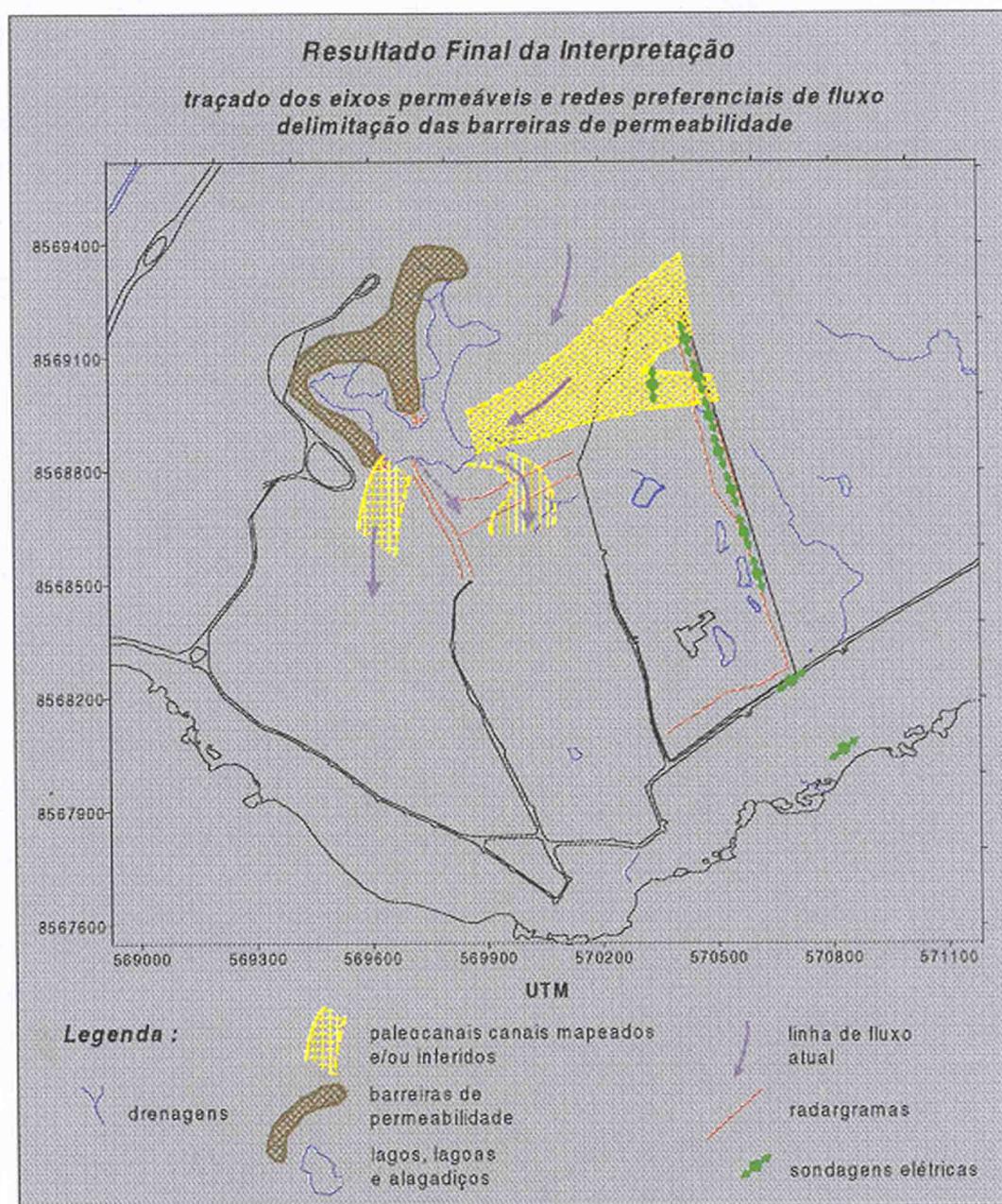


Figura 6.1: Resultado final da interpretação hidrogeológica dos levantamentos geofísicos.

pelo radar, através da descrição morfoscóptica das amostras de areia escavadas.

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus familiares, e em especial aos meus pais, pelo amor e dedicação que sempre permeiou nosso lar. Essas componentes formam os alicerces que tornaram minha jornada possível e significativa.

Ao prof. Olivar, pelo constante apoio e incentivo, desde os primeiros momentos de nosso convívio, e pela orientação clara e precisa que marca os grandes mestres.

Aos primeiros mestres, responsáveis diretos por minha paixão pela geologia e geofísica, ainda na época da Escola Técnica: Prof. Luiz César Corrêa Gomes e Prof. José Cesar Franco Nobre Martins.

Ao Prof. Edson E. S. Sampaio pelo total apoio ainda nos primeiros momentos do bacharelado, sem o qual hoje provavelmente não o teria concluído.

Ao prof. Marco A. B. Botelho pela valiosa sugestão do processamento *CMP* e constante ajuda, com sua grande experiência, no processamento das seções de radar, em especial no processo de migração. Ao prof. Reynam da C. Pestana pelas contribuições também no processamento dos radargramas.

Ao prof. Hédison K. Sato pelo constante apoio na parte computacional e valiosas discussões e esclarecimentos sobre questões geofísicas.

Ao amigo e quase irmão Jorge Hora Passos, pela ajuda e companheirismo mesmo nos momentos mais difíceis. Aos colegas de curso, tanto da Geofísica como da Geologia, e em especial ao colega Jefferson S. Pitombo, pela ajuda nas tarefas de campo e na interpretação das sondagens elétricas.

Aos funcionários e amigos Mota, Luis Medeiros, Joaquim Lago e Lene, pela paciência e prestatividade constantes.

Aos professores e pesquisadores da *Colorado School of Mines* responsáveis pelo pacote de programa *CWP*, pelo espírito altruísta em distribuir gratuitamente tão útil ferramenta.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de Iniciação Científica durante os dois anos desta pesquisa.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, me ajudaram nesta jornada, o meu muito

obrigado! Essa conquista é em parte de vocês.

# Referências

- ALL-CHALABI, M., 1974. An analysis of stacking, RMS, average and interval velocities of a horizontally layered ground. *Geophysical Prospecting* 22, 458-475
- ARAÚJO, F. F. S., 1997. Uso de GPR e IP-espectral na avaliação da contaminação industrial numa área do polo petroquímico de Camaçari. Monografia de Mestrado. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica - UFBA. Salvador, Ba.
- AVANZO, P. E., 1988. Importância da geologia dos estudos de impacto ambiental: Abaeté, um exemplo. EDUFBA. Salvador, Bahia.
- BARBOSA, J. S. F. & DOMINGUEZ, J. M. L. (coordenadores), 1996. Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo. Superintendência de Geologia e Recursos Minerais - Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Salvador, Ba.
- BERES, M. & HAENI, F. P., 1991. Application of ground penetrating radar methods in hidrogeologic studies. *Ground Water*, 375-385.
- BERKHOUT, A. J., 1980. Sismic Migration - Imaging of acoustical energy by wave field extrapolation. *Development in Solid Earth Geophysics*, vol. 14B - Practical Aspects. Elsevier Science Publishing Company Inc. New York, NY, USA. First edition
- BERKHOUT, A. J., 1985. Sismic Migration - Imaging of acoustical energy by wave field extrapolation. *Development in Solid Earth Geophysics*, vol. 14A - Theoretical Aspects. Elsevier Science Publishing Company Inc. New York, NY, USA. Third revised and enlarged edition.
- BIGARELLA, J. J. & ANDRADE, G. O., 1964. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). Universidade de Recife. Arquivo do Instituto de Ciências da Terra, 2. 2-14.
- BIGARELLA, J. J., 1975. The Barreiras Group in Northeast Brazil. *Anais... Academia Brasileira de Ciências*, 47 (suplemento). 365-393.
- BITTENCOURT, A. C. S. P., 1971. Alguns aspectos da sedimentação recente na costa atlântica de Salvador. Monografia de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia.

- BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS BOAS, G. S.; FLEXOR, J. M.; MARTIN, L., 1978. Excursão sobre as formações quaternárias do litoral do Estado da Bahia. Simpósio Internacional sobre a Evolução Costeira no Quaternário - Livro-guia. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica - Universidade Federal da Bahia. São Paulo, SP.
- BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS BOAS, G. S.; FLEXOR, J. M.; MARTIN, L., 1979a. Geologia dos depósitos quaternários no litoral da Estado da Bahia. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia - Textos Básicos, vol1, SME/CPM. Salvador, Ba. 1-21.
- BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS BOAS, G. S.; FLEXOR, J. M.; MARTIN, L., 1979b. Quaternary marine formations of the coastal of the state of Bahia (Brazil). Proceedings of the "1978 International Symposium of Coastal Evolution in the Quaternary". K. SUGUIO, T. FAIRCHILD, L. MARTIN & J. M. FLEXOR (editores). São Paulo, SP. 232-253.
- BITTENCOURT, A. C. S. P., 1996. As coberturas terciárias e quaternárias do interior e da zona costeira. *In*: "Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo". Superintendência de Geologia e Recursos Minerais - Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Salvador, Ba. 171-181.
- BOTELHO, M. A. B., 1986. Modelamento sísmico na bacia do Recôncavo usando a técnica de traçamento de raios. Tese de Doutorado. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica - UFBA. Salvador, Ba.
- BOTELHO, M. A. B. & PESTANA, R. da C., 1996. Migração de dados de radar com correção topográfica simultânea. XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, Ba.
- CETREL/SEPLANTEC, 1992. Diagnóstico Ambiental da Lagoa do Abaeté. Relatório interno. Salvador, Ba.
- COHEN, J. K. & STOCKWELL, Jr. J. W., 1996. CWP/SU: Seismic Unix Release 29: a free package for seismic research and processing. Center for Wave Phenomena - Colorado School of Mines. Colorado, USA.
- DAVIS, J. L. and ANNAN, A. P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37,531-551.
- DIX, C. H., 1955. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20, 68-86.
- FREIRE, R. M. L., 1988. Migração por mudança de fase em duas etapas. Tese de Doutorado. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica - Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA.

- FISHER, E.; MCMECHAN, G. A.; ANNAN, A. P., 1992. Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics*, 57, 495-504.
- FUJIMORI, S., 1968. Granulitos e charnockitos de Salvador, Bahia. *Anais... Academia Brasileira de Ciências*, 40, 181-202.
- GRAVES, R. J.; LESMES, D. P.; LEE, J. M.; TOKSÖZ, M. N., 1996. Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar. *Geophysics*, 61, 683-695.
- GUIMARÃES, M. M. M., 1978. Evolução quaternária da costa atlântica de Salvador. Monografia de Mestrado. UFBA. Salvador, BA.
- HALE, D., 1984. Dip-moveout by Fourier transform. *Geophysics*, 49, 741-757.
- HUGGENBERGER, P.; MEIER, E. and PUGIN, A., 1994. Ground probing radar as a tool for heterogeneity estimation in gravel deposits: advances in data-processing and facies analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 31, 171-184.
- JESUS, V. F. de, 1978. Origem dos granolitos e granoblastitos de Itapoã. Monografia de Mestrado. UFBA. Salvador, BA.
- LIMA, O. A. L. de, 1979. Estudo da utilização de reservatórios subterrâneos naturais para armazenamento de água numa região semi-árida do nordeste brasileiro. Tese de Doutorado. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica - Universidade Federal da Bahia. Salvador, Ba.
- LIMA, O. A. L. de & SHARMA, M. M., 1992. A generalized Maxwell-Wagner in shaly sands. *Geophysics*, 57, 431-440.
- LIMA, O. A. L. de; MORAES, J. W. O. de; PITOMBO, J. S., 1996. Avaliação geofísica dos aquíferos costeiros da margem atlântica de Salvador, Bahia. XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, Ba.
- LIMA, O. A. L. de & MORAES, J. W. O. de. 1997. Avaliação geofísica do sistema aquífero na área do Parque das Lagoas e Dunas do Abaeté - Salvador, Bahia. submetido ao V Congresso Internacional da SBGf. São Paulo, SP.
- LUIZ, J. G. & COSTA E SILVA, L. M. da., 1990. Geofísica de prospecção. EDUFPA. Belém, PA.
- MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS BOAS, G. S.; FLEXOR, J. M., 1979a. Introdução ao estudo do Quaternário do litoral do Estado da Bahia, trecho Salvador-Ilhéus. *Revista Brasileira de Geociências*, 9, 309-320.
- MARTIN, L.; FLEXOR, J. M.; VILAS BOAS, G. S.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; GUIMARÃES, M. M. M., 1979b. Courbe de variations du niveau rélatif de la mer

- au cours des 7000 dernières années sur un secteur homogène du littoral brésilien (Nord de Salvador - Bahia). Proceedings of the "1978 International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary". K. SUGUIO, T. FAIRCHILD, L. MARTIN & J. M. FLEXOR (editores). São Paulo, SP. 264-274.
- MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS BOAS, G. S., 1980a. Différentiation, sur photographies aériennes, des terrasses sableuses marines pleistocènes et holocènes du littoral de l'état de Bahia (Brésil). *Revue Photo Interprétation*, 3, fasc. 4-5, 5p.
- MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS BOAS, G. S., 1980b. Le Quaternaire marin brésilien (littoral pauliste, sud-fluminense et bahianais). *Cahier Orstom - Sér. Géol.*, XI(1). 99-124.
- MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; VILAS BOAS, G. S.; FLEXOR, J. M., 1980c. Mapa geológico do Quaternário costeiro do Estado da Bahia - 1:250.000 - texto explicativo. SME/CPM. Salvador, Ba.
- MORAES, J. W. O. de & BOTELHO, M. A. B. B., 1997. Processamento *CMP* em dados de radar (*GPR*) no detalhamento da subsuperfície. submetido ao V Congresso Internacional da SBGf. São Paulo, SP.
- MORAES, J. W. O. de & PESTANA, R. da C., 1995. Migração no domínio da frequência de dados sísmicos. XIII Encontro de Físicos do Norte-Nordeste. Salvador, Ba.
- NABIGHIAN, M. N. & ELLIOT, C. L., 1976. Negative induced-polarization effects from layered media. *Geophysics*, 41, 1236-1255.
- OLIVEIRA, E. P., 1990. Petrogenesis of mafic-ultramafic rocks from Precambrian Curaçá terrane, Brazil. Tese de Doutorado. Universidade de Leicester. GB.
- PESTANA, R. da C. & BOTELHO, M. A. B., 1997. Migração de dados de GPR ordenados em afastamento comum. submetido ao V Congresso Internacional da SBGf. São Paulo, SP.
- PORSANI, M. J. & URSIN, B., 1996. Mixed-phase signal deconvolution of seismic and ground penetrating radar data. 66th Annual International Meeting SEG, pp. 1603-1606.
- SABATÉ, P., 1996. Estruturas e tectônica do embasamento arqueano/proterozóico inferior do Estado da Bahia. *In*: "Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo". Superintendência de Geologia e Recursos Minerais - Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Salvador, Ba. p. 226.

- SANTOS, L. A. de O., 1993. Lagoas em Olhos D'água/Abaeté: sondagens exploratórias e viabilidade técnica. Companhia de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Salvador. Salvador, Ba.
- SCALES, J. A., 1994. Theory of Seismic Imaging. Samizdat Press. Center of Wave Phenomena - Colorado School of Mines. Colorado, USA.
- SUMNER, J. S., 1976. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, NY, USA.
- SUN, J. & YOUNG, R. A., 1994. Enhancement of ground penetrating radar stratigraphy by domain filtering. 64th SEG Meeting. Los Angeles, CA, USA.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E., KEYS, D. A., 1978. Applied geophysics. Cambridge university Press. Cambridge, GB.
- TILLARD, S. & DUBOIS, J., 1995. Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination. Journal of Applied Geophysics, 33, 77-91.
- VILAS BOAS, G. S.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; FLEXOR, J. M., 1979. Paleogeographic and Paleoclimatic Evolution during the Quaternary, in the Northern half of the coast of the State of Bahia, Brazil. Proceedings of the "1978 International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary". K. SUGUIO, T. FAIRCHILD, L. MARTIN & J. M. FLEXOR (editores). São Paulo, SP. 254-263.
- VILAS BOAS, G. S.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; MARTIN, L., 1980. Mise en évidence, sur photographies aériennes, d'une subsidence quaternaire de certaines parties de la baie de Todos os Santos (Brésil). Revue Photo Interprétation. Paris, França.
- VILAS BOAS, G. S., 1996. Sedimentos Terciários. *In*: "Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo". Superintendência de Geologia e Recursos Minerais - Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Salvador, Ba. 165-167.
- WARD, S. H., 1990. Resistivity and induced polarization methods. Investigations in geophysics num. 5, Geotechnical and Environmental Geophysics. SEG, 1990.
- YILMAZ, Ö., 1988. Seismic data processing. Soc. Explor. Geophys. ,2 526pp

**APÊNDICE A**

**ANEXOS**

## A.1 Famílias de tiro-comum - morro do Mirante

## A.2 Famílias de tiro-comum - Hotel Sofitel

## A.3 Programas para o Processamento de Famílias de Tiro-Comum

### A.3.1 Concatenação dos Tiros

Esta rotina concatena os traços das diversas famílias, uniformizando a quantidade de traços por tiro. Além disso, grava no cabeçalho dos traços as informações do intervalo de amostragem e posição da fonte, do receptor e do ponto médio, utilizando o pacote de programas *CWP* da *Colorado School of Mines*.

```

if [ "$1" = "" ]
then
echo '
                                DZT2AD.P'
echo 'rotina p/ transf. "file.dzt" em arquivo acesso direto'
echo '
                                preparada para shot-gather'
echo 'Modo de uso: dzt2ad.p c_max dt dxg dxs offset output'
echo 'n. de amostras em tempo = 512'
echo '1 - c_max = maior comprim. desejado p/ a secao, EM TRACOS'
echo '2 - dt = intervalo de amostragem temporal (em NANOSSEGUNDOS)'
echo '3 - dxg = intervalo entre receptores (em CENTIMETROS)'
echo '4 - dxs = intervalo entre fontes (em CENTIMETROS)'
echo '5 - offset = distancia fonte - 1@ receptor (EM CENTIMETROS)'
echo '6 - output = file de saida'
echo 'Atencao: infile sem a extensao ".dzt"!!!!'
echo 'Atencao: output sem QUALQUER extensao "!!!!'
else
#####
#!/bin/ksh
#
COMP='bc <<FIM
scale=0
$1+2
FIM'
PRIMEIRO=OK
#
rm -fr gssi.sgy fort.40 fort.41 fort.42
#
CONTA=$7
for arquivo in *.dzt
do
echo $arquivo
echo 'CONTA: $CONTA'
dzt2sgy2 $arquivo
suwind <file$CONTA.su >temp2 key=tracl min=3 max=$COMP

```

```

sustrip <temp2 >temp
rm -fr file$CONTA.su temp2
CONTA='bc <<FIM
scale=0
$CONTA+1
FIM'
if [ "$PRIMEIRO" = "OK" ]; then
    mv temp soma.ad
    PRIMEIRO=""
else
    cat temp >> soma.ad
fi
rm -fr temp
done
suaddhead ns=512 <soma.ad |
sushw key=dt,gx,sx a=$2,$5,0 b=0,$3,0 c=0,$4,$4 j=100,100,100 >$6.su
#
suximage <$6.su
fi

```

### A.3.2 Análise de Velocidades por Correção de Sobretempo Normal

A rotina abaixo executa a correção de Sobretempo Normal (*Normal Move-Out*), em um dado intervalo de velocidades, para uma única família de ponto-médio comum. Cada correção é feita considerando uma velocidade constante em todo o tempo. A saída é expressa por um arquivo contendo as correções de *NMO* concatenadas, com indicação das velocidades utilizadas.

```

if [ "$1" = "" ]
then
    clear
    echo '
                                VELAN2.P'
    echo 'Rotina para velan, para dados de gpr'
    echo 'Modo de uso: velan2.p file velini velfim dv dt ntr'
    echo 'n. de amostras em tempo = 512'
    echo 'file    = arquivo de entrada (CMP)'
    echo 'velini   = velocidade mais baixa para o velan (m/ns)'
    echo 'velfim   = velocidade mais alta para o velan (m/ns)'
    echo 'dv      = passada das velocidades (m/ns)'
    echo 'dt      = intervalo de amostragem em tempo (ns)'
    echo 'ntr     = numero de tracos do cmp'
else

```

```
#####
stackdata=$ivelan
DT='bc <<FIM
$5*1000
FIM'
velini='bc <<FIM
$2*100000
FIM'
velfim='bc <<FIM
$3*100000
FIM'
dv='bc <<FIM
$4*100000
FIM'
>$stackdata.su
echo "comecando o processo..."
echo "velocidade inicial: $velini"
echo "velocidade final: $velfim"
typeset -i vel=$velini
while [ vel -le $velfim ]
do
echo "velocidade: $vel"
        sushw <$1.su key=dt a=$DT |
        sunmo vnmo=$vel tnmo=0.0 >>$stackdata.su
sunull ntr=2 nt=512 dt=$DT >>$stackdata.su
vel=vel+dv
done
ncdp=$6
f2='bc -l <<FIM
$velini/100000
FIM'
d2='bc -l <<FIM
$dv/(100000*($ncdp+2))
FIM'

supsimage <$stackdata.su f2=$f2 d2=$d2 d1=1 dinum=100 ntic1=5 \
title="VELAN (NMO com vel. const.) "$stackdata \
label1="tempo (ns)" label2="velocidades (m/ns)" \
style=normal hbox=9 wbox=4.5 \
titlesize=18 labelsiz=12 >$stackdata.ps
fi
```

### A.3.3 Análise de Velocidades por Correção de Sobretempo Normal e Empilhamento de um Conjunto de Famílias de Ponto-Médio Comum

O programa a seguir listado realiza a análise de velocidades processando a correção de *NMO* e empilhamento de uma seqüência contígua de famílias de ponto-médio comum, tantas vezes quantas forem as velocidades especificadas. A saída consiste de  $n$  seqüências de  $m$  traços empilhados, onde  $n$  indica o número de velocidades testadas e  $m$  representa a quantidade de famílias de ponto-médio comum empregadas.

```

if [ "$1" = "" ]
then
clear
echo '
                                VELAN.P'
echo 'Rotina para velan, fazendo empilhamento, para dados de gpr'
echo 'Modo de uso: cmp.p file vini vfim dv cmpini cmpfim cmpinc dt'
echo 'n. de amostras em tempo = 512'
echo 'file      = arquivo de entrada (shot-gather bruto)'
echo 'vini       = velocidade mais baixa para o velan (m/ns)'
echo 'vfim       = velocidade mais alta para o velan (m/ns)'
echo 'dv        = passada das velocidades (m/ns)'
echo 'cmpini     = primeiro cmp a ser processado'
echo 'cmpfim     = ultimo cmp da sequencia'
echo 'cmpinc     = distancia entre cmp adjuntos, em centimetros'
echo 'dt ,      = intervalo de amostragem em tempo (ns)'
else
#####
stackdata=$1stack
stackdata2=w$1stack
DT='bc <<FIM
$8*1000
FIM'
JANELA='bc -l <<FIM
($DT*512)/50000000
FIM'
velini='bc <<FIM
$2*100000
FIM'
velfim='bc <<FIM
$3*100000
FIM'
dv='bc <<FIM
$4*100000
FIM'

```

```

cmpini=$5
cmpfim=$6
cmpinc=$7
>$stackdata.su
echo "comecando o processo..."
echo "velocidade inicial: $velini"
echo "velocidade final: $velfim"
echo "CMP inicial: $cmpini"
echo "CMP final: $cmpfim"
typeset -i vel=$velini
while [ vel -le $velfim ]
do
echo "velocidade: $vel"
    typeset -i section=$cmpini
    while [ section -le cmpfim ]
    do
        echo "empilhamento do cmp n: $section"
        suwind <$1.su \
key=cdp min=$section max=$section |
        sushw key=dt a=$DT |
        sunmo cdp=$section vnmo=$vel tnmo=0.0 |
        sustack >>$stackdata.su
        section=section+cmpinc
    done
sunull ntr=2 nt=512 dt=$DT >>$stackdata.su
vel=vel+dv
done
#
ncdp='bc -l <<FIM
($cmpfim-$cmpini)/$cmpinc+1
FIM'
f2='bc -l <<FIM
$velini/100000
FIM'
d2='bc -l <<FIM
$dv/(100000*($ncdp+2))
FIM'

supsimage <$stackdata.su f2=$f2 d2=$d2 d1=1 dinum=100 ntic1=5 \
title="VELAN (empilhamento c/ vel. const.) cmp "$cmpini_$cmpfim \
label1="tempo (ns)" label2="velocidades (m/ns)" \
style=normal hbox=9 wbox=4.5 \
titlesize=18 labelsiz=12 >$stackdata.ps

```

### A.3.4 Análise de Velocidades por *Semblance*

Este procedimento abaixo listado realiza o *semblance*, ou seja, o espectro de energia de empilhamento contra velocidades e tempos ( $s = E(v, t)$ ), para uma dada família de ponto-médio comum. O cancelamento (*mutting*) da onda direta é realizado para evitar valores espúrios no primeiros tempos.

```

if [ "$1" = "" ]
then
clear
echo '
                                SEMBLANCE.P'
echo 'Rotina para velan, fazendo semblance, para dados de gpr'
echo 'Modo de uso: cmp.p file vini vfim dv cmpini cmpfim cmpinc dt'
echo 'n. de amostras em tempo = 512'
echo 'file      = arquivo de entrada (shot-gather bruto)'
echo 'vini       = velocidade mais baixa para o velan (m/ns)'
echo 'vfim       = velocidade mais alta para o velan (m/ns)'
echo 'dv        = passada das velocidades (m/ns)'
echo 'cmpini     = primeiro cmp a ser processado'
echo 'cmpfim     = ultimo cmp da sequencia'
echo 'cmpinc     = distancia entre CMPs, em centimetros'
echo 'dt        = intervalo de amostragem em tempo (ns)'
else
#####
DT='bc <<FIM
$8*1000
FIM'
JANELA='bc -1 <<FIM
($DT*512)/50000000
FIM'
velini='bc <<FIM
$2*100000
FIM'
velfim='bc <<FIM
$3*100000
FIM'
dv='bc <<FIM
$4*100000
FIM'
nvel='bc <<FIM
scale=0
($velfim-$velini)/$dv+1
FIM'

```

```

cmpini=$5
cmpfim=$6
cmpinc=$7
echo "comecando o processo..."
echo "velocidade inicial: $velini"
echo "velocidade final: $velfim"
echo "numero de velocidades: $nvel"
echo "CMP inicial: $cmpini"
echo "CMP final: $cmpfim"
typeset -i section=$cmpini
while [ section -le cmpfim ]
do
echo "velan do cmp n: $section"
    suwind <$1.su \
key=cdp min=$section max=$section itmax=351 |
    sumute key=offset xmute=160,500,760,1000 \
tmute=0.000028,0.00004,0.000061,0.00015 |
    sushw key=dt a=$DT >cmp$section.su
    supswigp <cmp$section.su d1=1 dinum=50 ntic1=5 d2num=5 n2tic=5 \
title="CMP com mute" \
label1="tempo (ns)" label2="tracos" \
style=seismic hbox=9 wbox=2.5 \
titlesize=18 labelsiz=14 >cmpw$section.ps
    suvelan <cmp$section.su nv=$nvel dv=$dv fv=$velini \
dtratio=2 >semblance_2$section.su
PARAMA='sed -e 's/= /g' semblance$section.param |awk '{print $2}'
PARAMB='sed -e 's/= /g' semblance$section.param |awk '{print $4}'
echo "PARAMA: $PARAMA"
echo "PARAMB: $PARAMB"
    sushw <semblance_2$section.su key=dt a=$8 |
    supscontour d1=2 dinum=10 nitic=5 \
title="SEMBLANCE (dt=2ns)"$section nlabelc=2 fc=0.75 dc=0.05 cwidth=0.2 \
ccolor=blue,yellow,green,red,black \
grid1=dot grid2=dot \
label1="tempo (ns)" label2="velocidades (m/ns)" \
f2=$2 d2=$4 d2num=0.01 n2tic=2 \
style=seismic hbox=9 wbox=5 \
titlesize=18 labelsiz=14 >semblance_2$section.ps
    section=section+cmpinc
done
fi

```

### A.3.5 Conversão de Velocidades de Empilhamento para Velocidades Intervalares

O programa *FORTTRAN* a seguir listado realiza esta conversão utilizando a formulação de Dix, optando pela alternativa de reentrada dos dados para o caso de velocidades expressas por números complexos. Como saída, fornece arquivos contendo uma matriz de velocidades em função da posição horizontal e profundidade nos formatos ASCII e em acesso direto, além de arquivos ASCII contendo os dados de cada interface, para cada família de ponto-médio comum analisada.

```

parameter(nmax=50,nzmax=1000,nxmax=5000, nvelanmax=30)
real*16 vel(nmax),tempo(nmax)
real*16 velint(nmax,nvelanmax),zint(nmax,nvelanmax),temp1
real*4 velad(nxmax,nzmax)
dimension xvelan(nvelanmax)
integer n(nvelanmax)
character*20 output,output2,output3

write(*,*)'quantas analises de velocidade?'
read(5,*)nvelan
c
write(*,*)'de as coordenadas dos velans'
do itera=1,nvelan
  write(*,*)'coordenada x do velan n.',itera
  read(5,*)xvelan(itera)
enddo
c
do itera=1,nvelan
1 write(*,*)'quantas camadas?(num. de vels.+1)'
  read(5,*)n(itera)
  if (n(itera).le.1.or.n(itera).gt.nmax)then
    write(*,*)'Este numero deve ser maior que 1 ou menor/igual a'
    $,nmax,'Tente novamente'
    goto 1
  endif
  n(itera)=n(itera)-1
  write(*,*)'entre com os valores dos pares: tempo,velocidades'
  do j=1,n(itera)
    write(*,*)'par (t,v) numero',j
    read(5,*)tempo(j),vel(j)
  enddo
  write(*,*)'qual eh o arquivo de saida?'
  read(5,'(a)')output

```

```

c
c   corpo do programa
c
c   determinacao das velocidades intervalares e profundidades
c
    j=1
    do while(j.le.n(itera))
25      if(j.eq.1)then
          velint(j,itera)=vel(j)
          zint(j,itera)=(velint(j,itera)*tempo(j))/2.
        else
5          temp1=(vel(j)**2.*tempo(j)-(vel(j-1))**2.*tempo(j-1))
          if (temp1.lt.0.)then
              write(*,*)'dif. de vel negativa irah gerar n. complexo'
              write(*,*)'entre as camadas',j,'e',(j-1)
15          write(*,*)'modificar a camada',j,'?'
              write(*,*)'ou',(j-1),'?'
              read(5,*)modifica
              if (modifica.eq.j-1)then
                  write(*,*)'entre com o par (t,v) de',(j-1)
                  dif=sqrt(((vel(j)**2)*tempo(j))/tempo(j-1))
                  write(*,*)'(vel <',dif,')'
                  read(5,*)tempo(j-1),vel(j-1)
                  j=j-1
                  goto 25
              else
                  if (modifica.eq.j)then
                      write(*,*)'entre com o par (t,v) de',(j)
                      dif=sqrt(((vel(j-1)**2)*tempo(j-1))/tempo(j))
                      write(*,*)'(vel >',dif,')'
                      read(5,*)tempo(j),vel(j)
                  else
                      write(*,*)'valor invalido...'
                      goto 15
                  endif
              endif
          endif
          goto 5
        endif
        deltat=(tempo(j)-tempo(j-1))
        velint(j,itera)=sqrt(temp1/deltat)
        zint(j,itera)=zint(j-1,itera)+(velint(j,itera)*deltat/2.)
    endif
    j=j+1
enddo

```

```

c
c   escrevendo o arquivo de saida
c
  open(10,form='formatted',status='new',file=output)
  write(10,*)'# z , vi , t0 , ve #'
  do j=1,n(itera)
    write(10,20)zint(j,itera),velint(j,itera),tempo(j),vel(j)
  enddo
20  format(f5.2,',',f4.3,',',f4.0,',',f4.3)
  enddo
c
c   guarda a maior profundidade
c
  profmax=0
  do i=1,nvelan
    if(profmax.lt.zint(n(i),i))then
      profmax=zint(n(i),i)
    endif
  enddo
  write(*,*)'maxima profundidade=',profmax,' metros'
c
  write(*,*)'deseja arquivo de velocidades em ad? s=1, n=2'
  read(5,*)iresp
  if(iresp.eq.1)then
    write(*,*)'qual eh o dz (em centimetros)'
    read(5,*)dz
    write(*,*)'qual eh o dx (em centimetros)'
    read(5,*)dx
    nzmin=int(profmax*100./dz)+1
    nxmin=int((xvelan(nvelan)-xvelan(1))/dx)
    write(*,*)'diga as dimensoes da matriz (nx,nz)'
    write(*,*)'minimo de (',nxmin,',',nzmin,')'
    read(5,*)nx,nz
    write(*,*)'forneca o nome do arquivo de saida direta e ASCII'
    read(5,'(a)')output2,output3
c
c   montagem do arquivao de velocidades
c
  do itera=1,nvelan
    if(itera.eq.1.and.nvelan.gt.1)then
      do i=1,int((xvelan(itera+1)+xvelan(itera))/(2.*dx))
        k=1
        do j=1,nz
          if ((j*dz).le.(zint(k,itera)*100.))then

```

```

        velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
    else
        k=k+1
        if(k.gt.n(itera))then
            k=n(itera)
            velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
        else
            velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
        endif
    endif
enddo
enddo
else
    if (nvelan.gt.1.and.itera.lt.nvelan)then
nxinf=int((xvelan(itera)+xvelan(itera-1))/(2.*dx))
nxsup=int((xvelan(itera+1)+xvelan(itera))/(2.*dx))
do i=nxinf,nxsup
    k=1
do j=1,nz
    if ((j*dz).le.(zint(k,itera)*100.))then
        velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
    else
        k=k+1
        if(k.gt.n(itera))then
            k=n(itera)
            velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
        else
            velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
        endif
    endif
enddo
enddo
enddo
else
    if (nvelan.gt.1.and.itera.eq.nvelan)then
nxinf=int((xvelan(itera-1)+xvelan(itera))/(2.*dx))
do i=nxinf,nx
    k=1
do j=1,nz
    if ((j*dz).le.(zint(k,itera)*100.))then
        velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
    else
        k=k+1
        if(k.gt.n(itera))then
            k=n(itera)

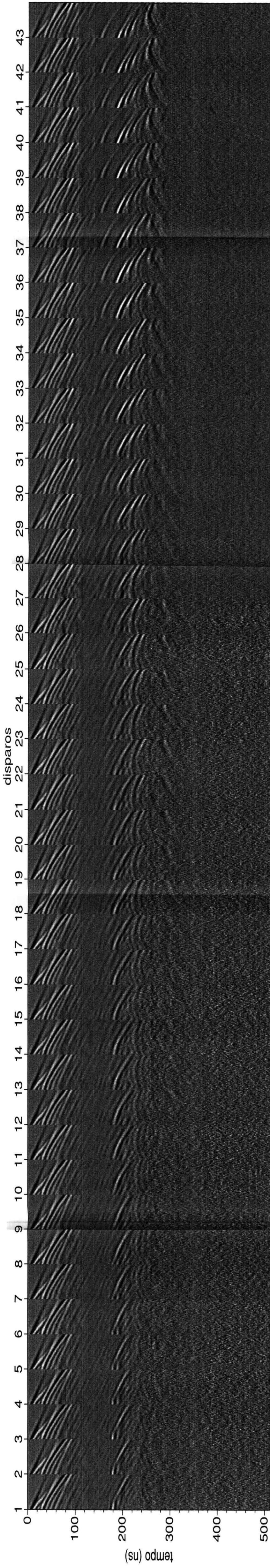
```

```

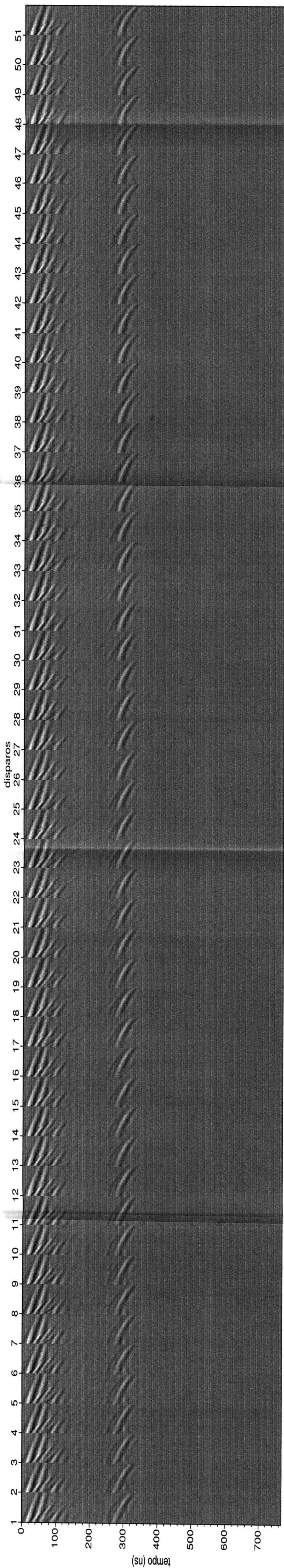
                                velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
                                else
                                velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
                                endif
                                endif
                                enddo
                                enddo
                                else
                                do i=1,nx
                                k=1
                                do j=1,nz
                                if ((j*dz).le.(zint(k,itera)*100.))then
                                velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
                                else
                                k=k+1
                                if(k.gt.n(itera))then
                                k=n(itera)
                                velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
                                else
                                velad(i,j)=velint(k,itera)*100000.
                                endif
                                endif
                                enddo
                                enddo
                                endif
                                . endif
                                endif
                                enddo
c
c   escrevendo a matriz de acesso direto
c
                                open(20,access='direct',recl=4*nz,status='new',file=output2)
                                open(30,form='formatted',status='new', file=output3)
                                do i=1,nx
                                do j=1,nz
                                write(30,40)i,j,velad(i,j)
                                enddo
                                enddo
                                do i=1,nx
                                write(20,rec=i)(velad(i,j),j=1,nz)
                                enddo
                                endif
40  format(i3,',',i3,',',f7.0)
                                stop

```

end



**Familias de tiro-comum - Morro do Mirante (Abaete) - SSA - BA**



**Familias de tiro-comum (sem ganho) - Hotel Sofitel - SSA - BA**