



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

CAROLINA NARJARA MAZZINI AMARAL

**EXPERIMENTO DE OTIMIZAÇÃO DE
LEVANTAMENTO MAGNETOTELÚRICO (MT)
PARA AMBIENTES COM SOLEIRA DE DIABÁSIO**

**BELÉM-PA
2007**

CAROLINA NARJARA MAZZINI AMARAL

**EXPERIMENTO DE OTIMIZAÇÃO DE
LEVANTAMENTO MAGNETOTELÚRICO (MT)
PARA AMBIENTES COM SOLEIRA DE DIABÁSIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica da
Universidade Federal do Pará – UFPA, em
cumprimento às exigências para a obtenção
de grau Bacharel em Geofísica.

Orientadora: Prof^a Dr^a Lúcia Maria da
Costa e Silva.

BELÉM-PA

2007

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

S58
6d

CDD 20º ed.:511.33

CAROLINA NARJARA MAZZINI AMARAL

**EXPERIMENTO DE OTIMIZAÇÃO DE
LEVANTAMENTO MAGNETOTELÚRICO (MT)
PARA AMBIENTES COM SOLEIRA DE DIABÁSIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica da
Universidade Federal do Pará – UFPA,
em cumprimento às exigências para a
obtenção de grau Bacharel em Geofísica.

Data de aprovação: ___/___/___

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof^a Lúcia Maria da Costa e Silva – Orientadora

Doutora em Geofísica

Universidade Federal do Pará

Prof. José Gouvêa Luiz – Membro

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará

Prof^a Brígida Ramati Pereira da Rocha – Membro

Doutora em Geofísica

Universidade Federal do Pará

À Dina Maria Souza Amaral.

AGRADECIMENTOS

À prof^a Lúcia Maria da Costa e Silva, mestre e amiga, a quem admiro muito como profissional e principalmente como pessoa.

Aos professores José Gouvêa Luiz e Brígida Ramati Rocha, por terem aceitado fazer parte desta banca e pelas sugestões feitas a este trabalho.

Ao prof^o João Batista Corrêa da Silva, pelas aulas de Redação Técnico-Científica, que tanto me ajudaram na elaboração deste trabalho e, em especial, pelas correções feitas ao *abstract* desse trabalho

À Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), por me conceder a oportunidade de desenvolver este trabalho, por meio da concessão de uma bolsa de iniciação científica.

Ao prof^o Mário Vicente Caputo, pelas lições de Geologia e por sempre me aceitar como aluna-ouvinte em suas disciplinas.

Ao prof^o Luiz Rijo, pelo incentivo dado nas primeiras disciplinas do curso. Aos professores Cícero Régis e Ellen Gomes e aos demais professores que formam o corpo docente desta faculdade de Geofísica, pelo empenho imensurável que têm todos os dias para fazer deste curso o melhor possível.

Ao Marcos Kaíre Miguel Sobrinho, pelas recomendações em seu trabalho que em muito motivou a realização deste.

Ao meu amigo e colega Fabrício, pelo companheirismo e incentivo e por estar presente nas horas mais importantes no decorrer do curso.

Aos colegas do curso de Graduação, em especial Fabrício, Miquéias, Danusa e Jefferson.

Aos colegas da disciplina de Desenho de Experimento, e do Grupo de Métodos Elétricos e Eletromagnéticos, pelo apoio.

À minha família, em especial a Ivan, Henrique, Marlúcia e Telma pela credibilidade.

RESUMO

O sucesso de um levantamento geofísico depende principalmente da diminuição do custo e do tempo gasto em cada etapa. Uma maneira de otimizar o levantamento seria saber, antes de ir ao campo, em que condições os dados devem ser coletados. Este tipo de investigação é conhecido como Desenho de Experimento. Este trabalho testa um roteiro passo-a-passo para Experimento de Otimização de Levantamento, tomando como exemplo a investigação magnetotelúrica (MT) de ambiente com alvo resistivo, caso específico das soleiras de diabásio, derrames de basalto e estruturas halocinéticas (sal), que têm interesse especial na prospecção de petróleo, pois dificultam sobremaneira o imageamento sísmico. O experimento consistiu na eleição das medidas que fornecessem mais informações sobre o corpo, determinação da banda de períodos ideal para realizar o levantamento MT e do arranjo com o mínimo de estações capaz, ainda assim, de permitir a investigação adequada do alvo. Os resultados mostraram que uma só componente dos dados – que neste caso foi a fase obtida com o modo TM – permite, por meio da interpretação, a reconstituição do alvo-fonte da anomalia. Além disso, foi possível eleger uma banda com poucos períodos para se obter adequadamente a referida reconstituição do alvo. O experimento, contudo esbarrou em dificuldades como a escolha de um arranjo ideal de estações.

Palavras-chave: Desenho de Experimento. Magnetotelúrico (MT). Soleira de Diabásio.

ABSTRACT

The success of a geophysical survey depends mainly of the decrease of cost and time of each stage. A way of optimize the survey would be know, before the field measurements, in which conditions the data should be acquired. This type of word is known as Experiment Design. This work tests a script step by step to to do this work, taking as example the magnetotelluric (MT) investigation of an environment with resistive target, as diabase sills, basalt flows and halocinetic structures (salt), which are of special interest in the oil prospection, because they make the seismic imaging very hard. The experiment consisted in the selection of the measurements that supplied more information about the body as well as the determination of the ideal band of periods to realize the MT survey and the array with the minimum of stations able to allow the adequate investigation of the target. The results showed that a single component of the data - the phase obtained by TM mode – is able to be used, by means of the interpretation, for the reconstruction of the target source of the anomaly. Furthermore, it was possible choose a band with few periods to get the cited reconstitution of the target. The experiment, however, found difficulties in the choice of an ideal stations array.

Keywords: Design of Experiment. Magnetotelluric Method (MT). Sill diabase.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	13
3	METODOLOGIA	16
3.1	INDICADORES.....	16
4	RESULTADOS	20
4.1	A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	20
4.2	DEFINIÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES ESPERADAS DE RESISTIVIDADE.....	21
4.3	DEFINIÇÃO DAS FAIXAS DE PERÍODOS E POSIÇÕES DAS OBSERVAÇÃO.....	22
4.4	OBTENÇÃO E ANÁLISE DE INDICADORES.....	22
4.4.1	Peso das Medidas	23
4.4.1.1	Comprovando as indicações com inversão.....	25
4.4.2	Seleção dos períodos	31
4.4.2.1	Comprovando as indicações com inversão.....	33
4.4.3	Seleção das estações	34
5	CONCLUSÕES	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Investigações geofísicas permitem estimar a distribuição de propriedade física da subsuperfície, de interesse nas pesquisas de recursos minerais, proteção ambiental, tectônica e outras, por conta da diminuição do custo e do tempo que elas proporcionariam a essas pesquisas. As investigações geralmente envolvem a aquisição de dados (medidas), seu processamento e interpretação, sendo seu êxito dependente da qualidade das medidas.

Uma maneira de melhorar a aquisição das medidas é saber, antes mesmo de realizar o levantamento, em que condições elas devem ser coletadas. Esse tipo de investigação é conhecido como desenho de experimento, embora por vezes seja também referido como planejamento ou análise de experimento. Neste trabalho o termo usado será experimento de otimização de levantamentos.

Em trabalhos com o método MT, por exemplo, o experimento de otimização do levantamento permitiria obter, com o mínimo de estações operando em curto intervalo de tempo, dados precisos suficientes para estimar a distribuição subsuperficial da propriedade física dentro de uma escala pré-estabelecida. Em outras palavras, indicaria a melhor faixa de períodos e as posições para as estações. Além disso, poderia contribuir informando quais dados teriam maior influência sobre a resolução da resposta esperada, a robustez e a sensibilidade do modelo e, ainda, indicar o método de interpretação mais adequado.

O desenho de experimento deveria ser uma das tarefas do início do planejamento da prospecção e ser usado durante todo o programa da mesma, de modo a melhorar a aquisição. Isto não ocorre por não se reconhecer neste procedimento a possibilidade de obter o máximo de informação das medidas ao mesmo tempo em que se dá importância demasiada à interpretação por meio de inversão. Esta, contudo, não pode compensar a falta de qualidade dos dados.

Presentemente, este tema vem sendo abordado por autores de diversas áreas da geofísica, sendo mais freqüente experimentos com métodos sísmicos [por ex. BERG, CURTIS e TRAMPERT (2003), e CURTIS (2004)] e com métodos eletromagnéticos, como CURTIS e MAURER (2000), STUMMER, MAURER e GREEN (2004), MAURER, BOERNER e CURTIS (2002), CURTIS

(2004). Aqui, contudo, o interesse será dado a experimentos realizados com métodos elétricos e eletromagnéticos.

CURTIS e MAURER (2000) apresentam uma revisão sobre desenho de experimento, como forma de otimizar um levantamento de campo.

STUMMER, MAURER e GREEN (2004) apresentam um procedimento de desenho de experimento para dados de resistividade que permite estimar quais configurações de eletrodos fornecem a melhor informação a um custo efetivo, no qual se supõe que o custo é proporcional ao número de medidas.

MAURER, BOERNER e CURTIS (2002) apresentam uma revisão sobre várias técnicas de desenho de experimento e mostram exemplos tanto de experimentos eletromagnéticos no domínio da frequência como de experimentos com corrente direta.

SILVA (2006), em seu trabalho sobre o desenvolvimento de uma nova metodologia para a interpretação de dados MT, propõe uma forma de realizar o desenho de experimento passo-a-passo e demonstra sua validade para o caso em que o interesse recai sobre um corpo condutivo em uma encaixante resistiva. Neste trabalho, será testada essa metodologia para a investigação de um corpo resistivo em um ambiente condutivo.

Corpos resistivos em meios condutivos não são, em geral, alvo de um trabalho MT. No entanto, apresentam resistividade superior ao meio as soleiras de diabásio, os derrames de basalto e as estruturas halocinéticas (sal), que são de interesse na prospecção de petróleo. Esses corpos apresentam alto contraste de impedância acústica, impedindo o seu imageamento pela sísmica.

Neste trabalho, será estudada uma soleira de diabásio. O diabásio pode percorrer centenas de quilômetros de profundidade até profundidades menores por meio de materiais físseis ou falhas e se acumular formando soleiras cujo duto vertical pode ou não estar presente. As soleiras de diabásio são comuns em bacias sedimentares, sendo associadas à presença de hidrocarbonetos, porque causam o chamado craqueamento térmico das rochas geradoras. A Bacia do Solimões, por exemplo, a segunda maior produtora de gás no país e a quinta na produção de óleo, em realidade é imatura para a geração de hidrocarbonetos, mas o magmatismo básico, responsável pela formação das

soleiras, ao agir como uma estufa, permitiu a maturação da matéria orgânica, propiciando a geração de óleo e gás na bacia (MIGUEL SOBRINHO, 2007). No Brasil, além da Bacia do Solimões, as ocorrências mais comuns de ambientes sedimentares com soleiras de diabásio são: a Bacia do Amazonas e a Bacia do Parnaíba, que também apresentam reconhecido potencial petrolífero.

MIGUEL SOBRINHO (2007) mostra que soleiras de diabásio são detectáveis pelo MT bem como variações geométricas das mesmas (salto de soleira e bifurcação de soleira), apontando a necessidade de se estudar a otimização do levantamento MT na presença de soleiras, como forma de acelerar a aceitação dos trabalhos MT na prospecção de petróleo.

No capítulo dois é apresentada uma abordagem sucinta sobre os fundamentos teóricos do Método MT. No capítulo três é apresentada a metodologia da otimização do levantamento, seguindo a proposição de SILVA (2006).

No capítulo quatro são apresentados os resultados da aplicação da metodologia de SILVA, seguidos de sua verificação por meio de inversão. Por fim, o capítulo cinco reúne as conclusões.

2 MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

O método magnetotelúrico (MT) baseia-se na propagação de campos eletromagnéticos para estimar a distribuição de algumas propriedades elétricas da subsuperfície. Estes campos são em parte originados de variações no campo magnético terrestre causadas por partículas ionizadas emitidas pelo Sol (plasma) que ao se propagarem pela subsuperfície induzem correntes elétricas que originarão campos secundários.

Os campos primários, somados aos campos gerados na subsuperfície (campos secundários), sobrepõem-se formando os campos resultantes. Estes campos quando detectados na superfície podem fornecer informações das propriedades elétricas em profundidade, como a resistividade elétrica (SILVA, 2006).

Os campos usados no MT apresentam períodos superiores a 1 s (até 10^3 s ou mesmo 10^4 s), tornando possível investigações a grandes profundidades. Para investigações mais rasas tem-se o Método AMT (Áudio Magnetotelúrico), variante do MT que utiliza a faixa de audiofrequências situada entre 1 Hz e 10^4 Hz. Neste trabalho será usada uma faixa de frequências indo de 10^4 s a 10^4 Hz, que compreende a faixa MT e a faixa AMT. A faixa usada neste trabalho será, no entanto, referida como MT.

As variações no tempo, das componentes horizontais dos campos resultantes elétrico e magnético, são medidas no campo em direções ortogonais simultaneamente em estações. As medidas das componentes do campo magnético são feitas com magnetômetros ou bobinas de indução magnética. As componentes do campo elétrico, por sua vez, são medidas por meio da diferença de potencial entre pares de eletrodos não polarizáveis, dividida pela distância entre eles.

As medidas feitas no domínio do tempo são processadas no domínio da frequência, estando relacionadas de acordo com a equação abaixo:

$$E_i = Z_{ix}(\omega)H_x(\omega) + Z_{iy}(\omega)H_y(\omega), \quad (2.1)$$

Em que Z corresponde a elementos complexos do tensor de impedâncias. Os subscritos x e y referem-se aos eixos ortogonais de medidas (em geral, Norte-Sul

e Leste-Oeste, respectivamente). O subscrito i pode ser tanto x como y . Finalmente, ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, f é a frequência em Hertz e T , o período em segundos).

A impedância permite obter a resistividade aparente (ρ_a) e a fase (θ), por meio da expressão:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \|Z\|^2 \text{ e} \quad (2.2)$$

$$\theta = \arg(Z), \quad (2.3)$$

em que μ é a permeabilidade magnética dos materiais (usualmente, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m). A impedância Z é expressa em ohm, a resistividade aparente é expressa em ohm.m e a fase em graus ($^\circ$).

A profundidade de penetração de uma onda eletromagnética plana é relacionada com a condutividade do meio e a frequência pela expressão:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503 \sqrt{\rho T}, \quad (2.4)$$

a qual mostra que a amplitude da onda eletromagnética decai à medida que a profundidade aumenta. A penetração é diretamente proporcional à resistividade do meio atravessado e ao período da oscilação eletromagnética.

A equação linear 2.1 apresenta duas variáveis e resolver uma equação da qual se desconhecem dois parâmetros somente é possível quando existem pelo menos dois conjuntos independentes de medidas. Para isso, cada estação permanece no campo até que eventos de atividade de mesmo período sejam várias vezes registrados (Silva, 2006).

Os resultados da sondagem MT (SMT) foram apresentados neste trabalho em pseudo-seções do logaritmo da resistividade aparente e da fase, ambas em função do log do período.

Após cada conjunto de resultados da inversão, são apresentadas pseudo-seções construídas com as posições das estações do perfil (y) nas abscissas e o logaritmo dos períodos ($\log T$) nas ordenadas. O logaritmo dos períodos cresce com a profundidade, de modo que as ordenadas da seção refletem o aumento da profundidade. Nas pseudo-seções, os isovalores do

logaritmo da resistividade aparente ($\log \rho_a$) representando as medidas de campo foram lançados nos gráficos com linhas pretas. Esse tipo de representação permite observar o ajuste entre todos os dados, porque cada pseudo-seção reúne os dados de todas as SMTs (sondagens magnetotélúricas, $\log \rho_a$ vs $\log T$) quanto forem as estações ocupadas ou de todos os caminhamentos ($\log \rho_a$ vs y) quanto forem os períodos amostrados. Além da pseudo-seção, é fornecido o erro médio quadrático (rms) da diferença entre os dados de entrada e os dados ajustados.

O método MT é tratado em detalhe, entre outros, em LUIZ (1999), LUGÃO (1991), SILVA (2006) consultados neste trabalho.

3 METODOLOGIA

O desenho de experimento em MT envolve quatro etapas (SILVA 2006):

1ª) formulação do problema inverso de estimar as resistividades em subsuperfície;

2ª) definição das distribuições espaciais de resistividade esperadas;

3ª) definição das faixas de períodos e das posições das observações e

4ª) obtenção e análise de indicadores.

A primeira etapa corresponde à definição do modelo a ser usado (que será uma malha representando a variação espacial discreta da propriedade física) e a definição do funcional geofísico ajustante.

A segunda etapa envolve a definição das distribuições de resistividade possíveis para o modelo, de acordo com o conhecimento da área de interesse, em geral, geológico.

A terceira etapa corresponde à eleição das faixas de períodos e das posições das observações, segundo o alvo da investigação, instrumentos disponíveis e condições de logística.

Finalmente, a quarta etapa lida com a seleção do melhor arranjo de estações e períodos para estimar as resistividades, o que pode ser feito com os indicadores – funções escalares cujo extremo (máximo ou mínimo) deve ser analisado.

3.1 INDICADORES

A relação entre os parâmetros do modelo e as observações produzidas por estes é não linear, embora para perturbações infinitesimais dos parâmetros Δp_j , resultando em pequenas variações nas observações Δd_i , seja possível escrever:

$$\mathbf{G}(\mathbf{p}^*)\Delta\mathbf{p} = \Delta\mathbf{d}, \quad (3.1)$$

em que a matriz de sensibilidade $\mathbf{G}(N \times M)$ (N corresponde ao número de observações e M corresponde ao número de parâmetros) contém informação sobre a interdependência entre os parâmetros do modelo e o funcional ajustante, no entorno da solução esperada \mathbf{p}^* (SILVA 2006).

Agora é necessário fatorar \mathbf{G} , por meio de decomposição em valores singulares. A decomposição em valores singulares permite determinar numericamente o posto de uma matriz, o qual, por sua vez, possibilita conhecer a informação presente nos dados.

A decomposição de \mathbf{G} conduz a:

$$\mathbf{G} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T, \quad (3.2)$$

$N \times M$ $N \times N$ $N \times M$ $M \times M$

em que \mathbf{U} e \mathbf{V} são matrizes ortogonais.

A matriz \mathbf{U} tem colunas compostas por um conjunto de N vetores ortonormais – que são vetores-base com módulos unitários que geram o espaço de dados. A matriz \mathbf{V} , por sua vez, tem como colunas M autovetores ortonormais de dimensão M , que são vetores-base de módulos unitários que geram o espaço de parâmetros do modelo válido no entorno da solução esperada \mathbf{p}^* . Finalmente, \mathbf{S} é uma matriz $N \times M$ com os valores singulares.

A matriz densidade de informação \mathbf{D} é definida como

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}_p \mathbf{U}_p^T \quad (3.3)$$

e a matriz resolução dos parâmetros \mathbf{R} como:

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}_p \mathbf{V}_p^T, \quad (3.4)$$

em que o subscrito P indica que \mathbf{U} e \mathbf{V} são uma partição de \mathbf{U} e \mathbf{V} correspondente à matriz \mathbf{S}_p , uma matriz diagonal $P \times P$ que contém os valores singulares não nulos de \mathbf{G} arranjados em ordem decrescente.

Os elementos da diagonal de \mathbf{D} mostram a capacidade de cada observação influenciar no ajuste dos dados. A diagonal de \mathbf{R} indica se a estimativa de cada parâmetro está próxima do valor do parâmetro verdadeiro.

Se o posto de \mathbf{G} é $P=N$, então $\mathbf{D}=\mathbf{I}$, sendo possível obter um ajuste

exato para as observações. Analogamente, se o posto de \mathbf{G} é $P=M$, $\mathbf{R}=\mathbf{I}$ e as estimativas dos parâmetros do modelo coincidem com os parâmetros verdadeiros. Isso é válido no entorno da solução verdadeira e se o modelo interpretativo for correto.

Se o valor da diagonal da matriz \mathbf{D} , relativo a uma dada posição da observação e a um período, estiver próximo a 1, esta observação predominará no ajuste das observações (e nas estimativas dos parâmetros do modelo); se o valor estiver próximo a zero, ela praticamente não influenciará o ajuste. As observações influentes mostram, por exemplo, a melhor faixa de períodos para o levantamento, embora também causem distorções nas estimativas dos parâmetros se estiverem contaminadas por ruído de alta amplitude.

Considerando agora a matriz \mathbf{R} , se o valor da diagonal estiver próximo a 1, ter-se-á uma boa resolução para o respectivo parâmetro, se estiver próximo de zero, o parâmetro terá uma má resolução. Essa matriz permitirá saber como o modelo estará sendo visto pelo método ou, no jargão geofísico, “iluminado”.

Os valores ideais indicados para as variáveis independentes por meio da análise das matrizes \mathbf{D} e \mathbf{R} são tentativos. Pode ser necessário investigar a resposta de arranjos com variáveis independentes no entorno desses valores. A comparação entre arranjos visando escolher o mais adequado para o levantamento pode ser feita a partir de diversos indicadores, dos quais consideraremos três descritos em detalhe em SILVA (2006):

O primeiro é obtido a partir da resolução r_i , de cada parâmetro do modelo, dada por:

$$r_i = R_{ii} \sum_{j=1}^M R_{ij} \quad (3.5)$$

r_i , varia de 0, para uma resolução pobre, a 1, para uma resolução ótima. A partir da resolução pode ser obtida uma medida da ‘capacidade’ $C\%$ do arranjo para resolver os parâmetros:

$$C\% = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_i \times 100 \quad (3.6)$$

O ideal é que a capacidade $C\%$ do arranjo de resolver os parâmetros esteja o mais próximo possível de 100%, pois menor será a dependência entre

os parâmetros. Na comparação entre diferentes arranjos, portanto, os melhores são os que possuem os maiores valores de C%.

É possível, ainda, gerar dados sintéticos para cada arranjo, inverter esses dados e comparar as soluções obtidas, de modo a chegar ao melhor arranjo. Esse seria o indicador mais robusto, embora demande tempo e seja dependente do tipo de informação a priori usado na inversão, ou seja, do programa de inversão.

4 RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados do experimento de otimização, seguindo o roteiro proposto por SILVA (2006).

4.1 A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O experimento de otimização inicia com a formulação do problema inverso, a qual engloba três tarefas (SILVA 2006).

A primeira é estabelecer o modelo interpretativo, baseado no conhecimento geológico da área de interesse (modelo geológico) e na criação de um modelo de distribuição da propriedade física nele fundamentado (modelo físico).

A figura 4.1-a apresenta a seção geológica para a área de estudo (modelo geológico) e a figura 4.1-b, a possível distribuição de resistividade (modelo físico) contornada por linha amarela. Por simplificação, foi considerado que o meio no qual se destaca a resistividade da soleira é homogêneo. O modelo interpretativo consiste de uma malha de blocos (ou células) mostrada na figura 4.2. A propriedade física de cada bloco é constante, mas como ela varia de bloco para bloco, permite representar distribuições de propriedade de geometrias arbitrárias. O modelo interpretativo, portanto, é uma malha na qual está representada a variação espacial discreta da propriedade física. No exemplo, ela é formada por 16x12 células de 500 m x 500 m cada uma.

A segunda tarefa corresponde ao estabelecimento de uma relação funcional teórica única entre os parâmetros do modelo físico e a resposta geofísica teórica que deverá estar relacionada às observações de campo (modelo matemático). A terceira tarefa consiste em definir, na relação funcional, os parâmetros a serem determinados e as variáveis independentes.

No problema inverso, a relação funcional pode ser escrita como $f(x, y, z, t, \mathbf{p})$, em que x , y , z e t são variáveis independentes fixadas pelo intérprete e \mathbf{p} é o vetor de parâmetros a ser estimado a partir das observações de campo. No experimento de otimização, os valores ótimos para x , y , z e t são

estimados a partir do conhecimento de \mathbf{p} e da relação funcional $f(x, y, z, t, \mathbf{p})$ sem observações de campo. Esta estimativa dos valores ótimos para as variáveis independentes utiliza tanto a própria relação funcional $f(x, y, z, t, \mathbf{p})$, como os seus gradientes em relação a todos os parâmetros, avaliados em uma determinada distribuição de resistividade \mathbf{p}^* e em todas as variáveis independentes. Esses gradientes estarão reunidos na matriz de sensibilidade, no caso não linear dada por:

$$G(\mathbf{p}^*) \equiv \left\{ \mathbf{g}_{ij} \right\} = \frac{\partial}{\partial p_j} f(x, y, z, t, \mathbf{p}) \Bigg|_{\substack{p_j = p_j^* \\ x = x_i, y = y_i, z = z_i, t = t_i}}, \quad (4.1)$$

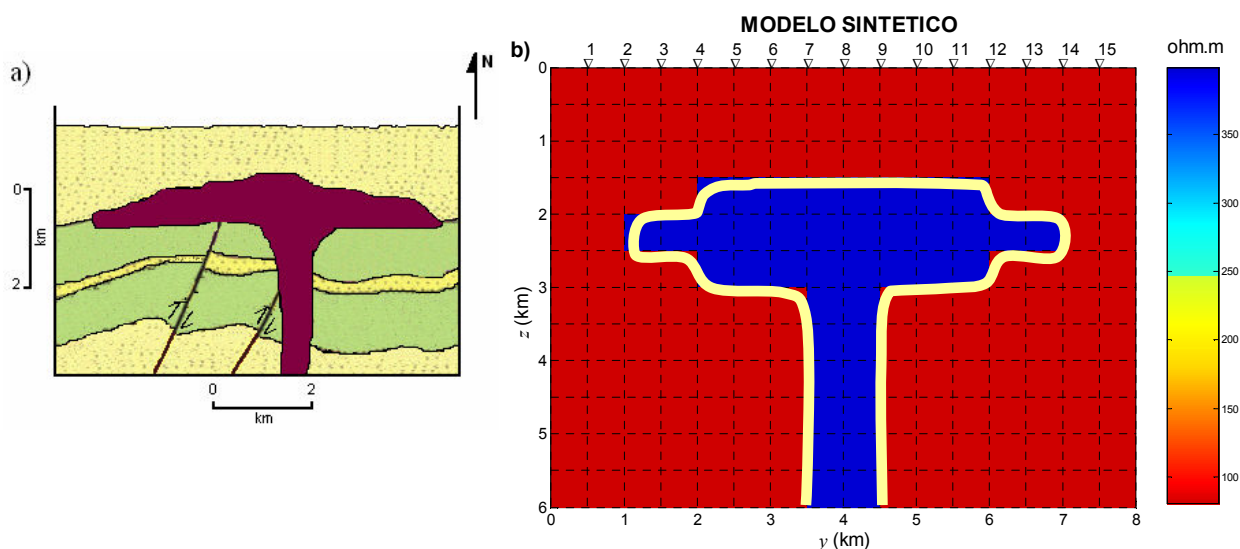


Figura 4.1 – (a) Seção geológica de um ambiente com soleira de diabásio. (b) Modelo físico contornado por linha amarela sobre o modelo interpretativo, este último correspondendo à malha de blocos (ou células) que representam a distribuição da propriedade física – neste caso, a resistividade, sendo os blocos em azul representativos da resistividade de 400 ohm.m e os blocos em vermelho, resistividade de 80 ohm.m.

4.2 DEFINIÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES ESPERADAS DE RESISTIVIDADE

Informações geológicas, geofísicas e de outras naturezas possibilitam estabelecer distribuições de resistividade próximas à situação real sob estudo.

Tomemos o exemplo escolhido para este trabalho: uma soleira de diabásio.

Imaginemos que a área de estudo seja formada por uma intercalação de camadas horizontais de arenito e folhelho de espessuras e resistividades variadas, cortada por duas falhas subverticais. Esta área sofreu a intrusão de uma soleira de diabásio que atingiu todas as camadas, como se pode observar na figura 4.1-a. O topo da soleira situa-se a uma profundidade de 1500 m e sua base, a 6000 m. Suponhamos também que a perfilagem elétrica de um furo de sondagem indicou que a resistividade média do meio é de 80 ohm.m e a da soleira, 400 ohm.m. É possível agora definir com maior precisão o modelo físico (figura 4.1-b).

A definição das distribuições esperadas de resistividade é, freqüentemente, realizada em conjunto com a etapa anterior (item 4.1).

4.3 DEFINIÇÃO DAS FAIXAS DE PERÍODOS E POSIÇÕES DAS OBSERVAÇÕES

A faixa de períodos dos campos eletromagnéticos empregados pelo MT está entre 10^4 e 10^{-4} s. Para cobrir 10^{-4} s a 10^4 s serão usados 61 períodos nesse intervalo, 8 por década, equidistantes em escala logarítmica, cobrindo precisamente de $0,178 \times 10^{-3}$ s (5623 Hz) a $5623,4133$ s ($0,178 \times 10^{-3}$ Hz).

O perfil MT será projetado com 8 km na direção y , de modo a cortar a área na qual se supõe estar presente a soleira, passando pelo seu centro, perpendicularmente ao seu eixo mais longo na direção x . As estações estarão dispostas a cada 500 m, nos nós de cada célula – exceto no primeiro e último nós – totalizando 15 estações. Assim, o espaço de observações que simulam as observações de campo compreende 915 medidas, pois elas serão feitas para todos os períodos em cada estação (61 períodos x 15 estações).

4.4 OBTENÇÃO E ANÁLISE DE INDICADORES

A etapa seguinte consiste na obtenção de dados para a análise do

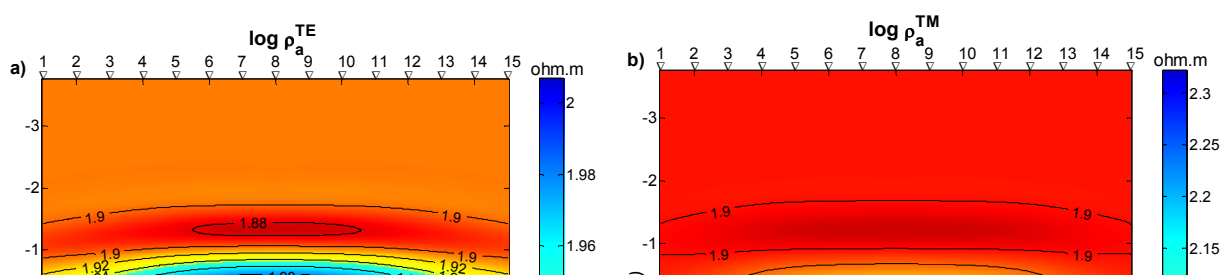
peso a ser atribuído às medidas e na seleção dos períodos e das estações. Cada análise é seguida de inversão, cujo objetivo é a confirmação das indicações obtidas.

A inversão é feita pelo **MÉTODO DESCRITIVO-GEOLÓGICO** (DesG), assim denominado por permitir a incorporação explícita de informação a priori de correlação fácil com a descrição geológica tradicional.

Com o DesG, o intérprete define por meio de elementos geométricos (pontos e linhas) o arcabouço de feições geológicas, bem como fornece valores de resistividade aos corpos geológicos presumidos. O método estima a distribuição de resistividade subsuperficial em termos de fontes anômalas próximas aos elementos geométricos, ajustando as respostas produzidas por estes corpos às medidas de campo. A solução obtida fornece então informações que podem auxiliar na modificação de algumas informações a priori imprecisas, permitindo que sucessivas inversões sejam realizadas até que a solução ajuste os dados e faça sentido geológico. Entre as características relevantes do método destacam-se: (i) os corpos podem apresentar resistividade maior ou menor do que a resistividade do meio encaixante, (ii) vários meios encaixantes contendo ou não corpos anômalos podem ser cortados pelo perfil e (iii) o contraste de resistividade entre corpo e encaixante pode ser abrupto ou gradativo.. Em outras palavras, este método de inversão desenvolvido por SILVA (2006), é mais adequado para a restituição do modelo físico-geológico original do que outros métodos de inversão como o *ridge* e a suavidade. Presta-se melhor, portanto, para verificar as indicações obtidas.

4.4.1 Peso das medidas

O levantamento MT fornece quatro medidas: resistividade aparente e fase no modo TE (respectivamente, ρ_a^{TE} e θ^{TE}) bem como no modo TM (ρ_a^{TM} e θ^{TM}).



O modelo da figura 4.1-b foi usado para o cálculo das medidas apresentadas sob a forma de pseudo-seções na figura 4.2. O eixo das abscissas representa a posição das estações e o eixo das ordenadas, o logaritmo dos períodos. O logaritmo dos períodos cresce com a profundidade, logo, as ordenadas indicam o aumento da profundidade. As pseudo-seções mostradas nas figuras 4.2-a e 4.2-c foram construídas com os dados do modo TE, enquanto 4.2-b e 4.2-d, com os dados do modo TM. Nas pseudo-seções das figuras 4.2-a e 4.2-b aparecem contornados os isovalores do logaritmo da resistividade aparente, já nas figuras 4.2-c e 4.2-d, os isocontornos da fase. Nas pseudo-seções apresentadas, a condutividade e a fase crescem do azul para o vermelho. Assim, tanto na resistividade aparente, como na fase, as anomalias resistivas associadas à presença do diabásio aparecem sempre em azul.

As regiões com maior gradiente (fase ou resistividade aparente) são as mais interessantes, pois apresentam maior sensibilidade à estrutura subsuperficial (MAURER e BOERNER, 1998¹, apud SILVA, 2006)

A soleira produz anomalias em todas as pseudo-seções. No entanto, anomalias obtidas com o modo TM – tanto de ρ_a como de θ – possuem amplitudes maiores do que as anomalias obtidas com o modo TE. Conseqüentemente, o peso maior na interpretação deve cair em TM, provavelmente na fase, que apresenta anomalia muito bem definida (delimitada). É interessante notar que as anomalias TM são menos extensas na direção y e mais extensas na direção z do que suas correspondentes no modo TE. Chama a atenção que a anomalia de ρ_a^{TM} prolonga-se em profundidade (figura 4.2-b).

As pseudo-seções revelam qualitativamente a variação da resistividade com a profundidade: camadas resistivas geram valores altos de ρ_a e valores de θ abaixo de 45° (figura 4.2), ao passo que camadas condutivas geram valores baixos de ρ_a e valores de θ acima de 45° .

Um aspecto importante é que ρ_a e θ , assim como os modos TE e TM, possuem sensibilidades diferentes (SILVA 2006): o modo TE é mais sensível a

¹ MAURER, H. e BOERNER, D. E., 1998. *Optimized design of geophysical experiments*. The Leading Edge, 17: 1119-1124.

estruturas condutivas profundas do que o modo TM, enquanto o modo TE é mais sensível a estruturas resistivas rasas do que o modo TM. A resistividade aparente contém informação completa sobre a resistividade da subsuperfície, enquanto a fase, informação sobre as variações relativas da resistividade. As anomalias na fase manifestam-se a períodos menores do que as anomalias na resistividade aparente.

A interpretação por meio do método direto ou da inversão deve levar em consideração todos os dados ou pode ser interpretado um só conjunto de dados (ρ_a^{TE} , θ^{TE} , ρ_a^{TM} ou θ^{TM}) ou uma combinação deles? SILVA (2006) destaca que, do ponto de vista prático, raramente a inversão conjunta dos quatro conjuntos de observações conduz a resultados satisfatórios, a menos que sejam atribuídos pesos diferentes às medidas. Os principais motivos são a já citada sensibilidade diferenciada de ρ_a e θ bem como dos modos TE e TM, mais o ruído sempre presente nas medidas. A complementaridade dos quatro conjuntos de observações deve, portanto, ser vista pelo prisma de que a falta de informação de um modo é complementada pelo outro (BERDICHEVSKY e DMITRIEV, 2002², apud SILVA, 2006). Há ainda um bom motivo para se avaliar se é necessário trabalhar com todos os dados: o tempo de processamento que se torna muito maior.

4.4.1.1 Comprovando as indicações com inversão

Na inversão foram usados como informação a priori a posição das duas linhas mostradas na figura 4.3 e os seguintes limites mínimo e máximo para a resistividade: 80 ± 8 ohm.m e 400 ± 40 ohm.m, respectivamente. Foi usado parâmetro de regularização $\alpha=0,1$ e fator de congelamento $\nu=1000$. O parâmetro de regularização corresponde ao menor valor que resulta em uma solução estável (SILVA, MEDEIROS e BARBOSA, 2001a³, apud SILVA 2006). O fator de congelamento é o valor para o peso de elemento da diagonal da matriz de pesos

² BERDICHEVSKY, M., N; DMITRIEV, V. I., 2002. *Magnetotelluric in the context of the theory ill-problems*. Tulsa, SEG. Investigations in Geophysics, v. 11, 215 p.

³ SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E; BARBOSA, V. C. F., 2001a. *Pitfalls in nonlinear inversion*. Pure and applied geophysics, 158: 945-964.

do método descritivo no congelamento. Os demais dados usados aparecem em detalhe em SILVA 2006 (p. 86).

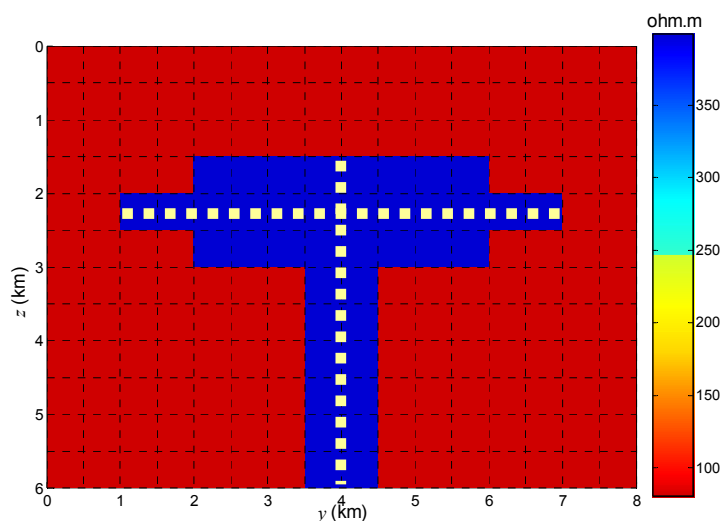


Figura 4.3 – Informação a priori fornecida para a inversão: linha tracejada em amarelo e limites para ρ de 400 ± 40 ohm.m (azul) e 80 ± 80 ohm.m (vermelho).

A escolha do conjunto de medidas com maior peso deve considerar o conjunto que permite a melhor recuperação do modelo físico, o melhor ajuste de dados e, ainda, o menor tempo gasto na inversão.

A figura 4.4 reúne as soluções da inversão obtidas com um único conjunto de medidas (ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} , θ^{TE} e θ^{TM}). As figuras 4.5 e 4.6 mostram as soluções obtidas com a combinação de medidas dois a dois e três a três, respectivamente. Por fim, a figura 4.7 mostra a solução obtida com a inversão conjunta de ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} , θ^{TE} e θ^{TM} . A tabela 4.1 mostra o número de iterações, o tempo gasto e o resíduo para cada inversão.

Na figura 4.4 pode-se observar que é a inversão de θ^{TM} que melhor permite recuperar o modelo físico (figura 4.4-4). Na figura 4.5, as melhores soluções foram obtidas por meio da inversão de θ^{TE} e θ^{TM} (figura 4.5-4) e, principalmente, ρ_a^{TE} e θ^{TM} (figura 4.5-5). Na figura 4.6, a melhor solução foi obtida com a inversão de ρ_a^{TE} , θ^{TE} e θ^{TM} (figura 4.6-1). Finalmente, a figura 4.7 mostra que a inversão do conjunto de dados ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} , θ^{TE} e θ^{TM} não permite recuperação tão satisfatória como aquelas anteriormente mencionadas, provando

que a inversão conjunta de todos os dados não conduz às melhores soluções, porque a sensibilidade dos mesmos é diferente.

A análise de todas as figuras permite eleger como soluções satisfatórias as soluções obtidas por meio da inversão da θ^{TM} e das combinações em que esta componente da fase aparece, sendo as melhores soluções aquelas obtidas com θ^{TM} e θ^{TM} figura 4.5-4), ρ_a^{TE} e θ^{TM} (figura 4.5-5) e ρ_a^{TE} , θ^{TE} e θ^{TM} (figura 4.6-1). Entretanto, com base no número de iterações feitas e o tempo gasto em cada inversão chega-se à conclusão de que a resposta ideal corresponde à solução obtida com a inversão de θ^{TM} .

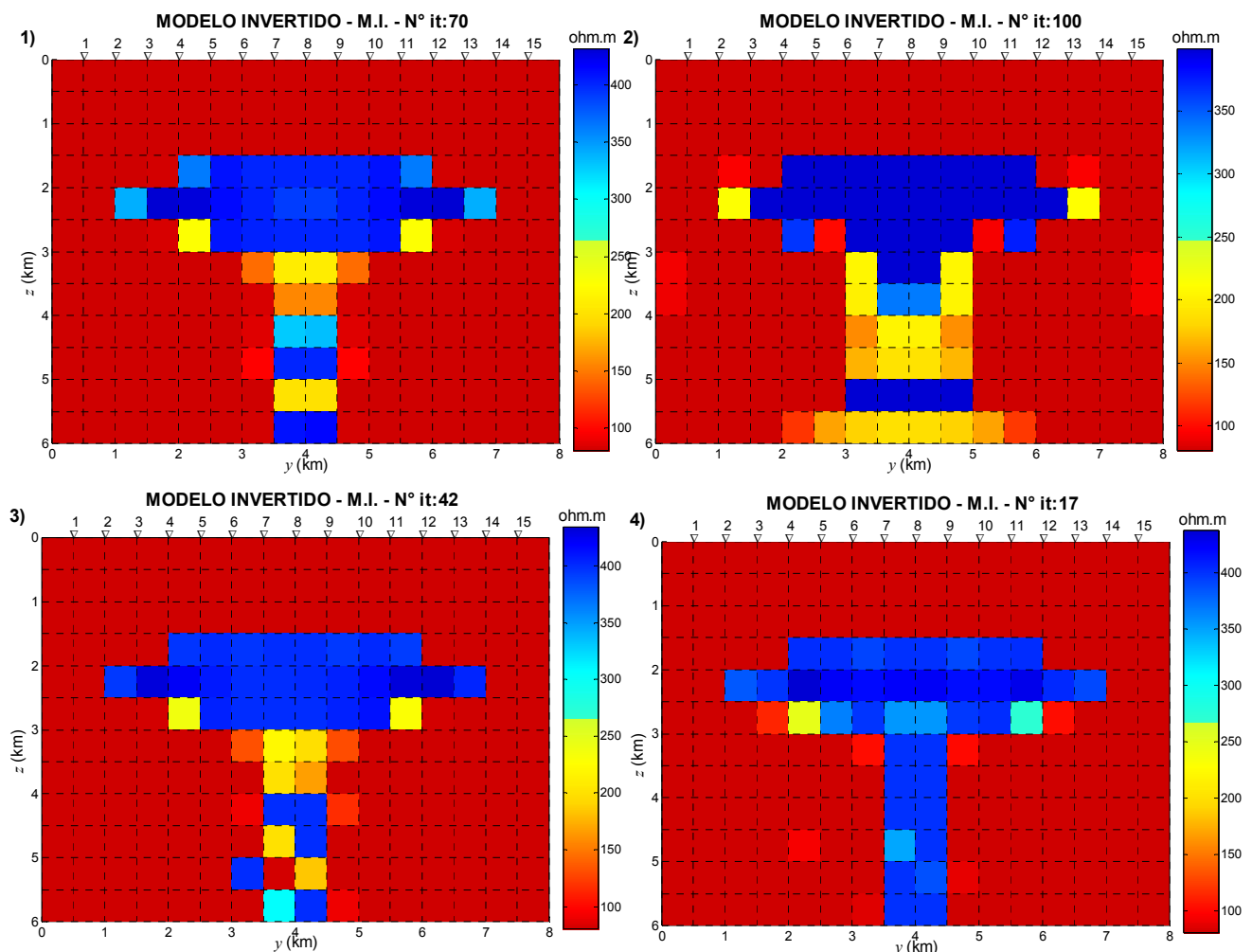


Figura 4.4 – Soluções obtidas com inversão de: 1) ρ_a^{TE} ; 2) ρ_a^{TM} ; 3) θ^{TE} e 4) θ^{TM} .

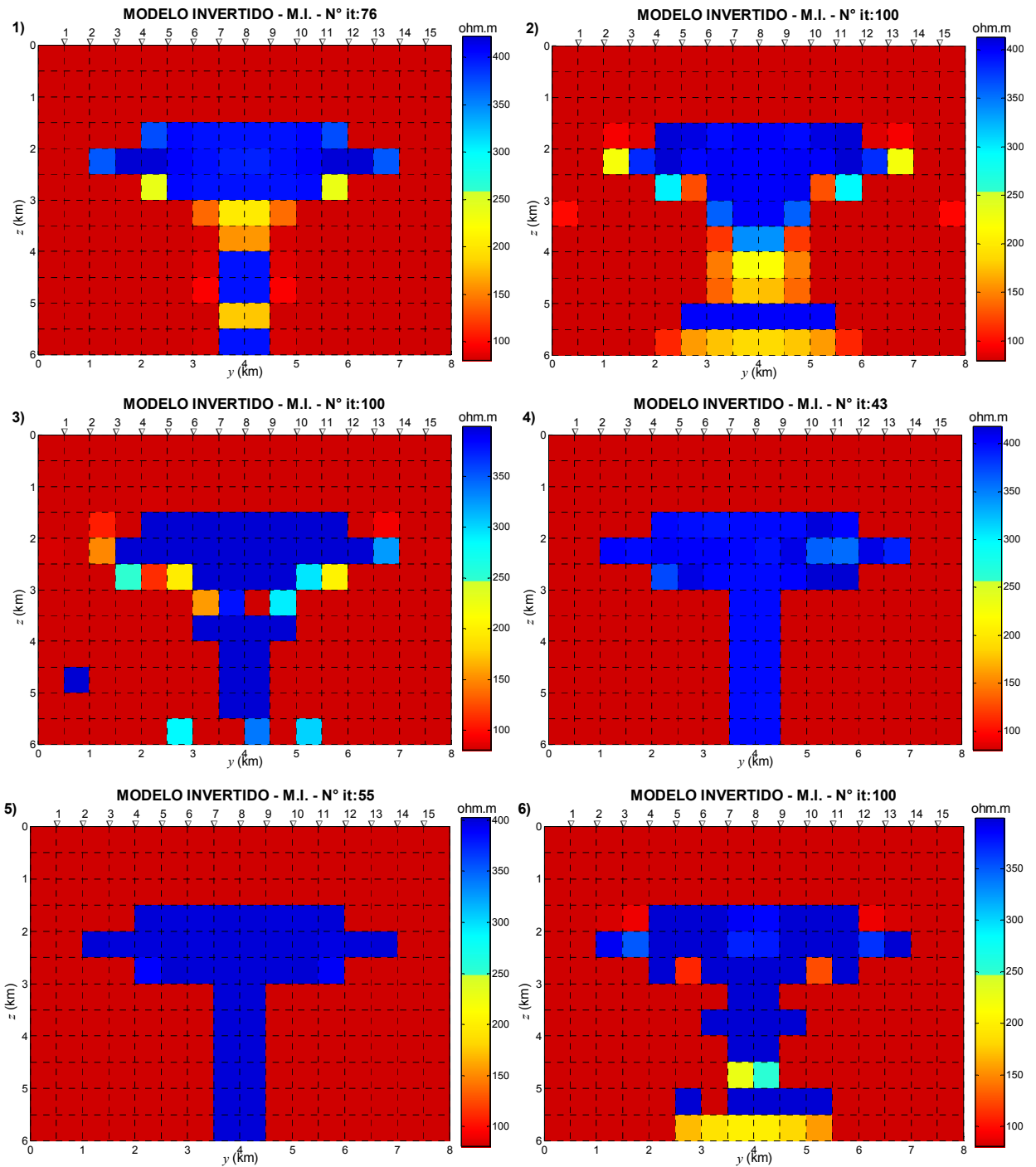


Figura 4.5 – Soluções da inversão de: 1) ρ_a^{TE} e θ^{TE} ; 2) ρ_a^{TM} e θ^{TM} ; 3) ρ_a^{TE} e ρ_a^{TM} e 4) θ^{TE} e θ^{TM} ; 5) ρ_a^{TE} e θ^{TM} ; 6) ρ_a^{TM} e θ^{TE} .

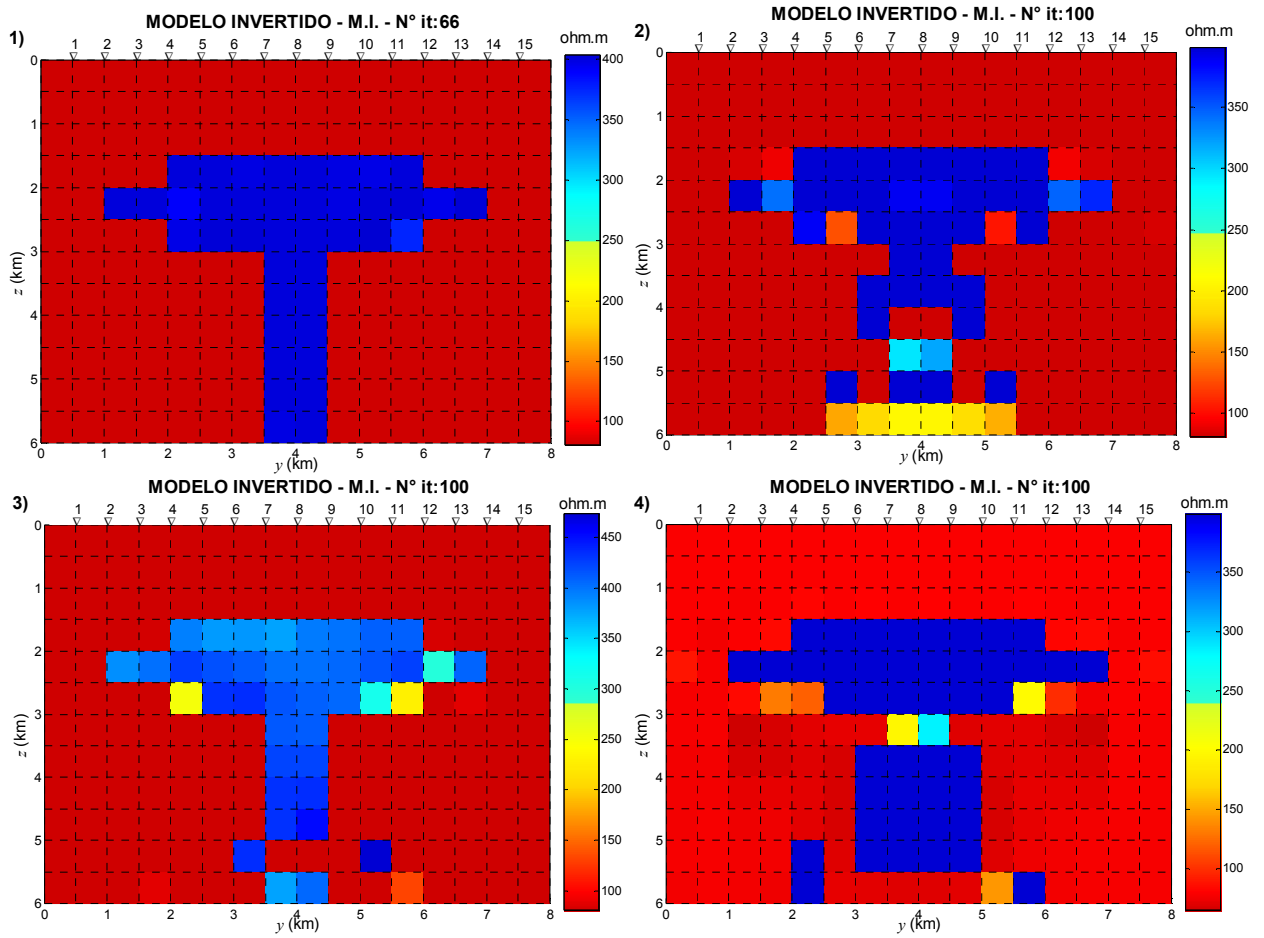


Figura 4.6 – Soluções da inversão de: 1) ρ_a^{TE} , θ^{TE} e θ^{TM} ; 2) ρ_a^{TM} , θ^{TE} e θ^{TM} ; 3) ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} e θ^{TE} e 4) ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} e θ^{TM} .

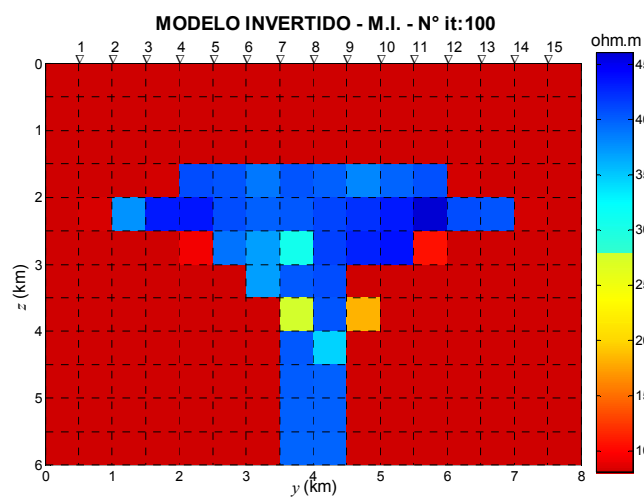


Figura 4.7 – Solução obtida com a inversão de: ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} , θ^{TE} e θ^{TM} .

Tabela 4.1 – Iterações, Tempo gasto e resíduo para cada solução de inversão de.

Figura	Solução obtida com a inversão de:	Nº Iterações	Tempo	Resíduo
4.4-1	1) ρ_a^{TE} .	100	1.706 s.	605
4.4-2	2) ρ_a^{TM} .	100	1.529 s.	920
4.4-3	3) θ^{TE} .	42	985 s.	728
4.4-4	4) θ^{TM} .	17	243 s.	237
	Combinações 2 em 2:			
4.5-1	1) ρ_a^{TE} e θ^{TE} .	76	1.833 s.	592
4.5-2	2) ρ_a^{TM} e θ^{TM} .	100	1.643 s.	1055
4.5-3	3) ρ_a^{TE} e ρ_a^{TM} .	100	3.840 s.	964
4.5-4	4) θ^{TE} e θ^{TM} .	43	1.644 s.	73
4.5-5	5) ρ_a^{TE} e θ^{TM} .	55	2.039 s.	16
4.5-6	6) ρ_a^{TM} e θ^{TE} .	100	3.863 s.	918
	Combinações 3 em 3:			
4.6-1	1) ρ_a^{TE} , θ^{TE} e θ^{TM} .	66	2.590 s.	27
4.6-2	2) ρ_a^{TM} , θ^{TE} e θ^{TM} .	100	4.133 s.	1057
4.6-3	3) ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} e θ^{TE} .	100	4.215 s.	756
4.6-4	4) ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} e θ^{TM} .	100	3.998 s.	1236
	Todas as componentes:			
4.7	1) ρ_a^{TE} , ρ_a^{TM} , θ^{TE} e θ^{TM} .	100	3.949 s.	560

4.4.2 Seleção dos períodos

O próximo passo é procurar uma faixa menor de períodos que permita chegar à mesma solução obtida com a inversão usando-se os 61 períodos. Uma forma de escolher a melhor faixa de períodos é a análise da matriz de densidade de informação.

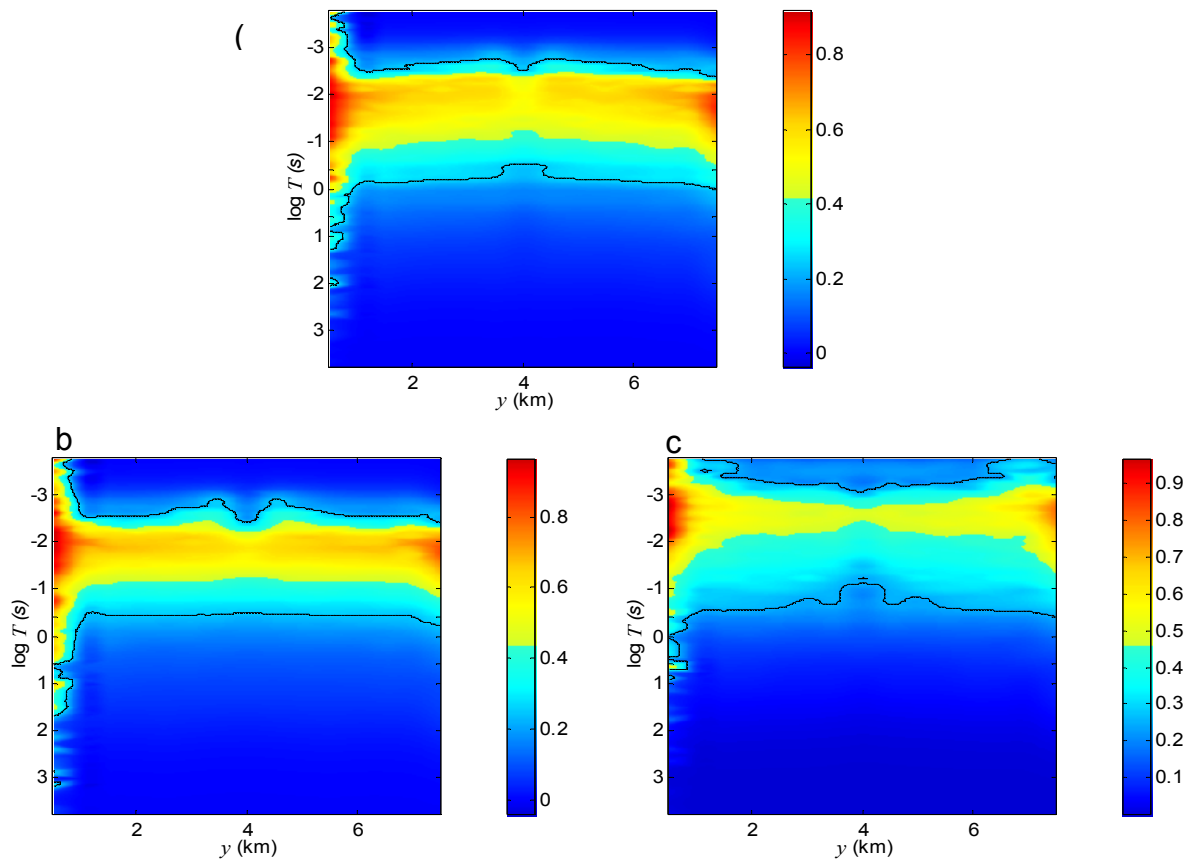


Figura 4.8 – Densidade de informação (diagonal de $\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{U}^T$) obtida por meio de θ^{TM} para: (a) Soleira de 400 ohm.m em encaixante de 80 ohm.m (Fig. 3.1(b)); (b) semi-espaço com 80 ohm.m e (c) semi-espaço com 400 ohm.m. As linhas pretas correspondem ao isocontorno igual a 0,3.

Tab. 4.2 – Bandas de período selecionadas.

FAIXA	PERÍODOS T (s)	Log T
1	0,00017782 a 0,00316 s	- 3,75 a - 2,24
2	316,22 s a 5,62 s	- 2,49 a -1
3	0,1 s a 3,16 s 10 s a 0,31 s	- 1 a 0,5

A matriz de densidade de informação das medidas \mathbf{D} é obtida por meio da decomposição em valores singulares da matriz de sensibilidade (eq. 3.3). Com os valores da diagonal da matriz \mathbf{D} referentes a todos os valores singulares foram construídas pseudo-seções para as estações vs o logaritmo do período (figura 4.8). Na decomposição foram consideradas apenas as medidas de θ^{TM} . A figura 4.8-a apresenta os resultados considerando a soleira com resistividade igual a 400 ohm.m e a encaixante resistividade igual a 80 ohm.m. As figuras 4.8-b e 4.8-c representam os resultados da decomposição para um semi-espaço homogêneo com resistividade de 80 ohm.m (figura 4.8-b) e 400.ohm.m (figura 4.8-c), respectivamente. O valor da diagonal da matriz de densidade de informação cresce do azul para o vermelho. Como referência, os isocontornos de 0,3 aparecem em tracejado preto.

A pseudo-seção da figura 4.8-a mostra valores de densidade de informação elevados no intervalo de 0,00316 a 0,1 s (log T = -2,5 a -1). A pseudo-seção mostrada na figura 4.8-b, por sua vez, construída para o semi-espaço de 80 ohm.m, mostra resultado semelhante ao anterior obtido para a soleira, mas a períodos ligeiramente maiores, aproximadamente entre 0,5 e 0,001 s (log T = -0,25 a -3). A figura 4.8-c, obtida para o semi-espaço de 400 ohm.m, apresenta valores de densidade elevados para períodos bem menores – entre 0,01 e 0,001 s (log T = -2 a -3) – do que aqueles observados na figura 4.8-b, que explicam o deslocamento e o espessamento dos valores elevados de densidade de informação mostrada na figura 4.8-a. O isocontorno de 0,3 evidencia que a banda de períodos ideal pode se estender para períodos maiores do que 0,1 (log T=-1).

A análise aponta, por conseguinte, como banda ideal: 0,00316 a 0,17782 s ($\log T = -2,5$ a $-0,75$). A tabela 4.2 mostra essa banda de períodos, destacada com sombreado cinza, bem como uma banda acima e outra abaixo desta para testes de inversão.

4.4.2.1 Comprovando as indicações com inversão

As figuras 4.9 e 4.10 e 4.11, correspondem aos resultados das inversões de θ^{TM} obtido com as faixas 1, 2 e 3, respectivamente.

A solução obtida com a faixa 1 (figura 4.9) não permite identificar os limites da soleira. Isso independe do valor do parâmetro de regularização. Foram realizados testes com o parâmetro variando de 10 a 0,001, mas as respostas obtidas foram semelhantes à resposta apresentada na figura 4.9.

As soluções obtidas com a faixa 2 (figura 4.10) permitem a recuperação da soleira, sendo a solução obtida com parâmetro de regularização $\alpha=1$ (figura 4.10-b) melhor do que a solução obtida com parâmetro de regularização $\alpha=0,1$ (figura 4.10-a).

A solução obtida com a faixa 3 (figura 4.11) mostra perda de resolução no topo da soleira, em ambas as respostas: para o parâmetro de regularização $\alpha=0,1$ (figura 4.11-a, e para $\alpha=1$ (figura 4.11-b). O modelo interpretativo obtido com a faixa 2 é, portanto, a solução mais próxima da solução ideal.

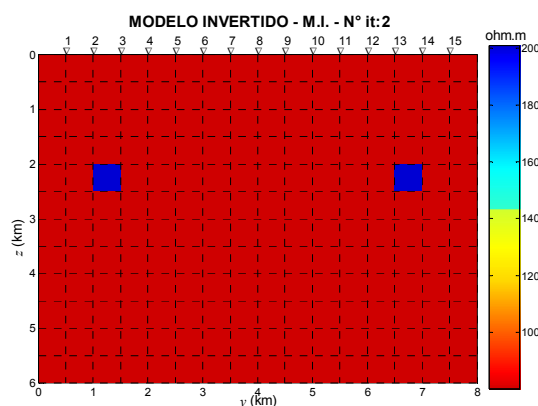


Figura 4.9 – Solução da inversão de θ^{TM} obtida com 13 períodos da faixa 1 da tabela 3.2. Parâmetro de regularização $\alpha = 0,1$

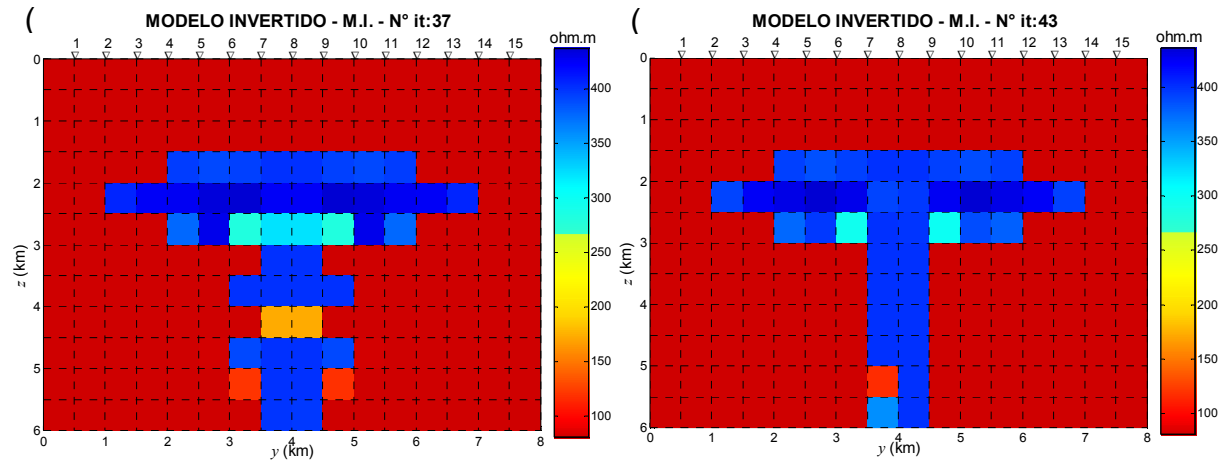


Figura 4.10 – Soluções da inversão de θ^{TM} obtida com 13 períodos da faixa ideal (faixa 2 da tabela 3.2): (a) Parâmetro de regularização $\alpha = 0,1$ e (b) $\alpha = 1$.

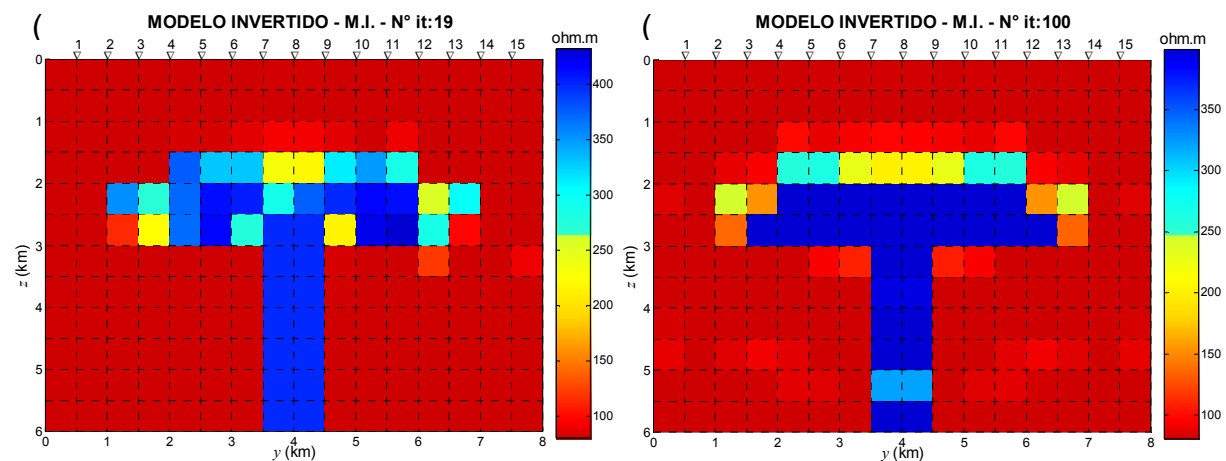


Figura 4.11 – Soluções da inversão de θ^{TM} obtida com 13 períodos da faixa 3 (tabela 3.2): (a) parâmetro de regularização $\alpha = 0,1$ e (b) $\alpha = 1$.

4.4.3 Seleção das estações

Finalmente, o próximo passo é verificar a necessidade de se usarem todas as estações de medida ou se é possível descartar algumas delas.

Uma forma de escolher as estações provém da análise da matriz de resolução de parâmetros.

A matriz de resolução dos parâmetros foi obtida por meio da decomposição em valores singulares da matriz de sensibilidade (equação 3.4). Com os valores da diagonal da matriz \mathbf{R} , referentes aos valores singulares

superiores a 0,1, foram construídas pseudo-seções para a distância vs a profundidade dos centros das células do modelo interpretativo. Na decomposição foram consideradas apenas as medidas de θ^{TM} sobre o modelo da figura 4.1 (estações 4 a 9). O valor da diagonal da matriz de resolução dos parâmetros cresce do azul para o vermelho. Na análise que segue, contudo, os valores iguais a zero foram contornados também com uma tonalidade de vermelho.

A pseudo-seção obtida com a faixa 2 de períodos é mostrada na figura 4.12. Enquanto nas seções de SILVA (2006) o corpo aparece claramente iluminado (isto é, no corpo e ao seu redor aparecem valores elevados para a resolução), na seção da figura 4.12 não há indicação de que o corpo está ou não sendo iluminado. Aparece, contudo, marcando o topo da soleira, valores iguais a zero (em vermelho).

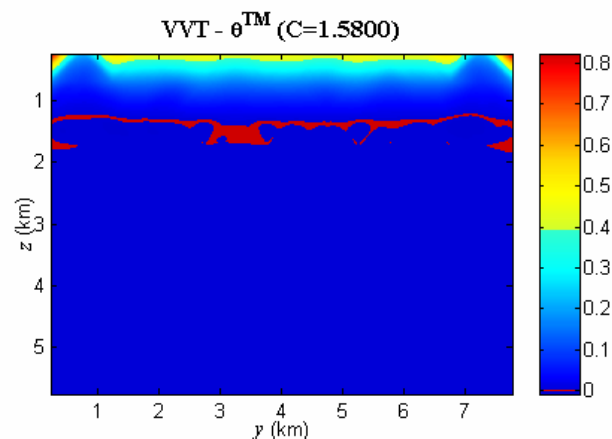


Figura 4.12 – Resolução dos parâmetros (diagonal de $\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{V}^T$) para θ^{TM} . Mínimo valor singular a ser considerado igual a 0,1. Faixa 2 de períodos, $T = 316,22$ s a $5,62$ s (0,0031 a 0,1 Hz).

A pseudo-seção obtida com os 61 períodos é mostrada na figura 4.13. Novamente, o corpo não é iluminado, mas na posição ocupada pela soleira surge uma “sombra” com limites muito semelhantes aos limites da soleira formada por valores iguais a zero, destacados em vermelho.

Nesse estágio do trabalho foram, então, levantadas as seguintes hipóteses para explicar a ausência de valores elevados de resolução ocupando a posição da soleira (indicando sua iluminação): i) a fase não seria adequada ao estudo de resolução, ii) o contraste entre a soleira e a encaixante não é elevado o suficiente, e, ainda, iii) o fato de se estar procurando um corpo resistivo em uma encaixante condutiva (e não o contrário, como ocorre na maioria das situações). Para tentar responder a estas questões, foram realizados os três testes mostrados na figura 4.14. Neles foram usados os 61 períodos.

A figura 4.14-a mostra a pseudo-seção com a resolução obtida para ρ_a^{TE} para um corpo de 400 ohm.m meio imerso em um meio de 80 ohm.m. Na figura, é possível observar valores de resolução de parâmetros iguais a zero (em tom de vermelho) formando uma sombra que se assemelha aos limites da soleira.

A figura 4.14-b mostra a solução obtida para θ^{TM} sobre um corpo de 1000 ohm.m em um meio de 10 ohm.m. Nesta figura, o corpo não aparece iluminado, apenas a porção mais superficial do terreno, como é comum.

Finalmente, a figura 4.14-c mostra a solução obtida para θ^{TM} sobre um corpo de 10 ohm.m em um meio de 1000 ohm.m. Nesta figura, a porção superficial da soleira aparece iluminada, mas não sua porção mais profunda, mas isto decorre da banda de períodos utilizada não ser a mais apropriada.

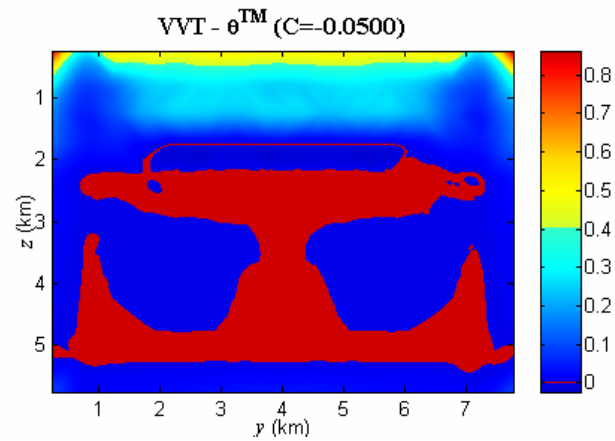


Figura 4.13 – Resolução dos parâmetros (diagonal de $\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{V}^T$) para θ^{TM} . Mínimo valor singular a ser considerado igual a 0,1; número de períodos: 61, $T = 5623,41$ s a 0,0001 s.

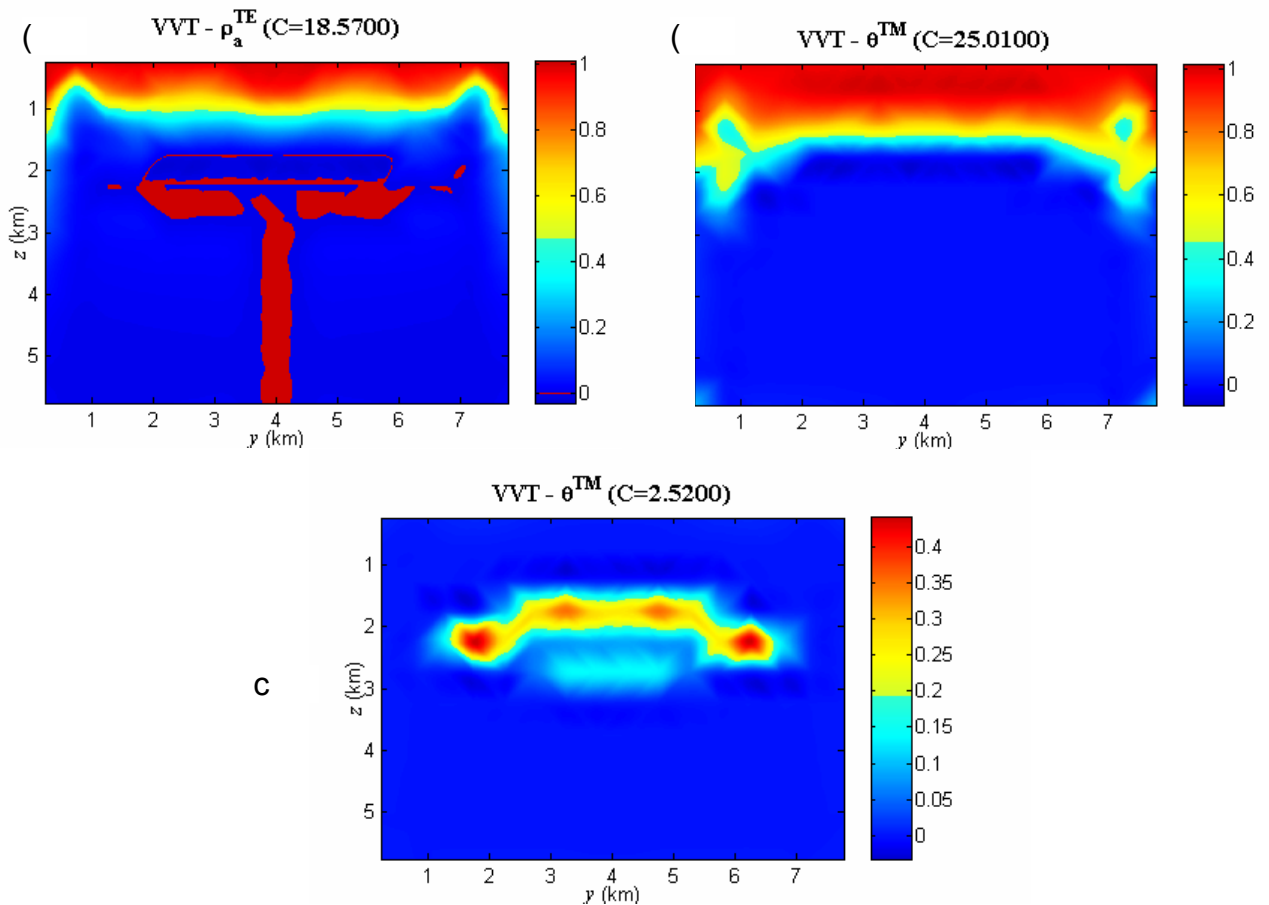


Figura 4.14 – Resolução dos parâmetros (diagonal de $\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{V}^T$). Resultado dos testes considerando: (a) ρ_a^{TE} (corpo: 400 ohm.m; encaixante: 80 ohm.m), (b) θ^{TM} com forte contraste entre alvo resistivo (1000 ohm) e meio condutivo (10 ohm.m); (c) θ^{TM} com forte contraste entre alvo condutivo (10 ohm) e meio resistivo (1000 ohm.m). Mínimo valor singular considerado igual a 0,1. Número de períodos: 61 (5623,41 s a 0,0001778 s).

5 CONCLUSÕES

Na interpretação MT, o trabalho com a fase é muitas vezes preterido, porque é muito mais fácil correlacionar a resistividade com a geologia. Aqui, foi mostrado que a fase é capaz de levar a resultados melhores do que a resistividade aparente.

Mostrou-se, também, que dificilmente a inversão conjunta das quatro observações (ρ_a e θ , nos modos TE e TM) conduz a resultados satisfatórios, devido às diferentes sensibilidades de cada grupo de observações. Além disso, esse procedimento onera porque demanda maior tempo de computação.

O experimento de otimização torna possível obter informações que melhoram sobremaneira um levantamento, desde a coleta de dados até a interpretação. No caso estudado, foi possível eleger a fase como a medida que deveria receber maior peso, bem como foi estabelecida uma faixa reduzida de períodos como a faixa ideal de trabalho. Com essas informações foi possível chegar, por meio da solução da inversão, ao modelo físico procurado, o que acarretou economia de tempo de processamento.

A resolução do problema de se imagear abaixo de estruturas com alto contraste de impedância acústica, que tanto problema cria para a sísmica, poderia, pelo que foi mostrado, ser auxiliada com o uso do MT, levantado de forma otimizada.

REFERÊNCIAS

- BERG, V. D.; CURTIS, A.; TRAMPERT, J. *Optimal nonlinear bayesian experimental design: an application to amplitude versus offset experiments*. Geophysics journal international (Geophysics j. int) ISSN 0956-540X, 2003, VOL. 155, n°2, pp.411-421
- CURTIS, A; MICHELINI, A; LESLIE, D; LOMAX, A.. *A deterministic algorithm for experimental design applied to tomographic and microseismic monitoring surveys*. Geophysics journal international (Geophysics j. int), ISSN 0956-540X, 2004, VOL. 157, p 595-606
- CURTIS, A. *theory of model-based geophysical survey and experimental design*. the leading edge: 2004, Vol. 23, No. 10, pp. 997-1004.
- LUGÃO, P.P.; FONTES, S.L., 1991. *Magnetotellurics on the eastern margin of the Recôncavo Basin, Salvador (Brazil)*. Anais do II Congresso Internacional da SBGf, vol. 1, pp:300-304.
- LUIZ, J. G. *Informação a priori na inversão de dados magnetotelúricos*. 1999. xiv, 93p. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geofísica. Belém, 1999.
- MAURER, H.; CURTIS, A. *Optimizing the design of geophysical experiments: is it worthwhile?* EOS Forum, 16 May 2000, Vol. 81, No. 20, p1058-162. Copyright by the American Geophysical Union.
- MAURER, H.; BOERNER, D.E.; CURTIS, A. *design strategies for electromagnetic geophysical surveys*. Geoscience and Remote Sensing, IEEe Transactions, Dec 2002, vol. 40, p.1097-1117.
- MIGUEL SOBRINHO, M. K. *Efeito do magnetismo sobre as respostas MT de soleiras de diabásio da Província de São Mateus*. TCC (Bacharel em Geofísica) Universidade federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica. Belém, 2007
- SILVA, L. M. C. *DesG: Uma nova metodologia para coleta de dados e inversão MT*. 2006. xiv, 169 f.. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geofísica. Belém, 2006.
- STUMMER, P.; MAURER, H.; GREEN, A. G. *Experimental design: electrical resistivity data sets That provide optimum subsurface information*. geophysics. Feb 2002. Vol. 69 , p 120-139.