

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**GEOTOMOGRAFIA ELETROMAGNÉTICA:
ALGORITMO TOMOGRÁFICO, FILTRO
BIDIMENSIONAL ADAPTATIVO E ALGORITMO DE
SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS**

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ELIEZER PEREIRA LOPES

Orientador: Professor Jorge Muniz Barreto

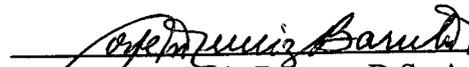
Co-orientador: Professor Luiz Muniz Barreto

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1998

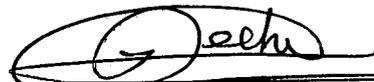
**GEOTOMOGRAFIA ELETROMAGNÉTICA:
ALGORITMO TOMOGRÁFICO,
FILTRO BIDIMENSIONAL ADAPTATIVO
E ALGORITMO DE SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS**

ELIEZER PEREIRA LOPES

ESTA TESE FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA , ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, E APROVADA NA SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.

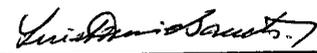


Prof. Jorge Muniz Barreto, D.Sc.A
Orientador



Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Luiz Muniz Barreto, D.Sc.



Prof. Luiz Costa da Silva, Ph.D.



Prof. Augusto César Bittencourt Pires, Ph.D.



Prof. Fernando Mendes de Azevedo, Dr.



Prof. Renato Garcia Ojeda, Dr.

*À minha madrinha, Maria da Conceição Lopes Pereira.
Aos meus pais; e ao meu irmão, Elizeu Pereira Lopes.*

Já muito sabe aquele que sabe que ignora certas coisas.

Luiz Muniz Barreto

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. CONCEITOS BÁSICOS DA TOMOGRAFIA GEOFÍSICA	1
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
1.3. APLICAÇÕES	9
1.4. A ANTENA LINEAR CURTA EM UM MEIO COM PERDAS	14
1.5. OBJETIVOS	18
CAPÍTULO 2 - DETERMINAÇÕES DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E DA PERMISSIVIDADE ELÉTRICA RELATIVA DE MEIOS HOMOGÊNEOS	21
2.1. INTRODUÇÃO	21
2.2. O ALGORITMO NÃO LINEAR	21
2.3. APROXIMAÇÕES DA ÓTICA GEOMÉTRICA	28
CAPÍTULO 3 - RECONSTRUÇÕES DE IMAGENS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E DE PERMISSIVIDADE ELÉTRICA RELATIVA DE MEIOS HETEROGÊNEOS	31
3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. O ALGORITMO TOMOGRÁFICO	33
3.3. O FILTRO DE IMAGENS	43
3.4. TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE ARTEFATOS NAS IMAGENS RECONSTRUÍDAS	51
3.5. SÍNTESE DO MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS DESENVOLVIDO	56
3.6. ESTIMATIVA INICIAL HOMOGÊNEA	57
3.7. VERSÃO ADITIVA GENERALIZADA DO ALGORITMO DE DINES E LYTLE	59
CAPÍTULO 4 - A INFLUÊNCIA DA INTERFACE SOLO-AR SOBRE OS DADOS MEDIDOS	60
4.1. INTRODUÇÃO	60
4.2. O MÉTODO	62
4.3. EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DESENVOLVIDO	71
4.4. CONCLUSÕES	75

CAPÍTULO 5 - COMPARAÇÃO ENTRE A GEOTOMOGRAFIA ELETROMAGNÉTICA E O RADAR DE SUBSUPERFÍCIE	76
5.1. INTRODUÇÃO.....	76
5.2. ESTUDO DE CASOS.....	77
5.3. CONCLUSÕES.....	85
CAPÍTULO 6 - SIMULAÇÕES	87
CAPÍTULO 7 - DISCUSSÃO	111
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES	122
ANEXO	129
GLOSSÁRIO	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
ÍNDICE REMISSIVO	152

LISTA DE SÍMBOLOS

c :	velocidade da luz no espaço livre.	h_c :	profundidade crítica.
d :	diâmetro de dipolo elétrico.	h_B :	profundidade em que o sinal refletido na interface solo-ar é teoricamente nulo.
d_{ij} :	densidade de raios associada à célula (i, j) .	\mathbf{H} :	vetor campo magnético.
D :	espaçamento entre dois poços verticais.	\mathbf{I} :	vetor corrente elétrica.
D_1 :	discrepância média de amplitudes associada à subjanela 1.	\mathbf{J}_c :	vetor densidade de corrente de condução.
D_2 :	discrepância média de amplitudes associada à subjanela 2.	\mathbf{J}_d :	vetor densidade de corrente de deslocamento.
D_3 :	discrepância média de amplitudes associada à subjanela 3.	L :	distância entre a antena transmissora e a antena receptora.
D_4 :	discrepância média de amplitudes associada à subjanela 4.	l_{ijk} :	comprimento da trajetória k na célula (i, j) .
\mathbf{E} :	vetor campo elétrico.	n :	nível de ruído.
f :	freqüência.	n_c :	número de pixels de uma janela que estão reconstruídos corretamente.
F_d :	fração da corrente elétrica total, influenciada por efeitos de deslocamento.		

n_e : número de pixéis de uma janela que estão reconstruídos erradamente.	x : vetor incógnita.
n_t : número total de pixéis de uma janela.	x'_{ij} : amplitude filtrada da célula (i, j) .
N_k : número de células atravessadas pela trajetória k .	\hat{x} : vetor unitário que apresenta a direção e o sentido crescente do eixo x .
Q : quantificador da influência do sinal refletido sobre o sinal de interesse.	\hat{y} : vetor unitário que apresenta a direção e o sentido crescente do eixo y .
\hat{Q} : quantificador da influência máxima do sinal refletido sobre o sinal de interesse.	γ_k : raio-soma associado à trajetória k .
r : índice de resolução.	γ'_k : raio-soma associado à trajetória k e degradado por ruído.
R : resolução digital.	α : fator de atenuação.
\mathbf{R} : vetor localização da antena receptora.	α_1 : fator de atenuação associado à frequência f_1 .
$R(\theta_i)$: coeficiente de reflexão para a onda plana que apresente o modo transversal magnético.	α_2 : fator de atenuação associado à frequência f_2 .
s : comprimento de dipolo elétrico.	β : fator de fase.
s_k : semente associada à trajetória k .	β_1 : fator de fase relativo à frequência f_1 .
\mathbf{T} : vetor localização da antena transmissora.	β_2 : fator de fase relativo à frequência f_2 .
\mathbf{u} : vetor unitário que apresenta a direção e o sentido de propagação da onda de superfície.	γ : fator de propagação.
	δ : distância euclidiana.
	$\Delta\phi$: variação da fase do campo elétrico na antena receptora.
	ε : permissividade elétrica.

Lista de Símbolos

ε_r : permissividade elétrica relativa.

η_0 : impedância intrínseca do espaço livre.

θ_B : ângulo de Brewster.

θ_i : ângulo de incidência.

θ_{ic} : ângulo crítico.

λ : comprimento de onda.

μ : permeabilidade.

σ : condutividade elétrica.

τ : variável de pesagem.

ω : frequência angular.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1.1 - <i>Uma possível geometria para a geotomografia</i>	3
Fig. 1.2 - <i>Distribuição dos poços no campo Richmond, na Califórnia</i>	7
Fig. 1.3 - <i>O dipolo elétrico curto com excitação central</i>	14
Fig. 1.4 - <i>O dipolo elétrico curto, localizado na origem de um sistema de coordenadas esféricas</i>	16
Fig. 2.1 - <i>Uma geometria que permite a utilização do método geotomográfico proposto</i>	24
Fig. 2.2 - <i>Diagrama esquemático da Fig. 2.1</i>	25
Fig. 3.1 - <i>Divisão do meio investigado em células</i>	35
Fig. 3.2 - <i>O filtro de imagens</i>	48
Fig. 3.3 - <i>O funcionamento do filtro de imagens proposto</i>	51
Fig. 3.4 - <i>Divisão da região de suporte de uma imagem reconstruída</i>	54
Fig. 3.5 - <i>A propagação da informação no processo de reconstrução de imagens</i>	55
Fig. 4.1 - <i>Trajetórias da onda eletromagnética entre as antenas transmissora e receptora, localizadas perto da interface solo-ar</i>	61
Fig. 4.2 - <i>Expressão gráfica do relacionamento entre os fatores que estabelecem a influência máxima do sinal refletido sobre o sinal que percorre o caminho direto</i>	65
Fig. 4.3 - <i>A onda lateral</i>	69
Fig. 5.1 - <i>Um sistema de radar montado em um helicóptero, para realizar sondagens geofísicas</i>	77
Fig. 5.2 - <i>Os dipolos cruzados resistivamente carregados</i>	82
Fig. 5.3 - <i>O campo petrolífero Signal Hill, em Long Beach, Califórnia</i>	84
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (a), (b) e (c)</i>	92
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (d) e (e)</i>	93
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (f) e (g)</i>	94
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (h) e (i)</i>	95
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (j) e (k)</i>	96
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (l) e (m)</i>	97
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (n) e (o)</i>	98
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (p) e (q)</i>	99
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (r) e (s)</i>	100
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (t) e (u)</i>	101
Fig. 6.1 - <i>Resultados das reconstruções das imagens (v) e (w)</i>	102
Fig. 6.2 - <i>Resultados das reconstruções das imagens, efetuadas pelo método proposto por Dines e Lytle</i>	109
Fig. 7.1 - <i>O sistema de coleta de dados em furos da Delta Epsilon</i>	119
Fig. 7.2. - <i>O guincho 300-1E da Delta Epsilon, um tripé e uma sonda</i>	120
Fig. 7.3. - <i>O guincho 1000-1E da Delta Epsilon</i>	121
Fig. G.1 - <i>Uma anticlinal</i>	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - <i>O comportamento convergente do algoritmo não linear proposto</i>	28
Tabela 4.1 - <i>Valores típicos de condutividade elétrica, permissividade elétrica relativa e fator de atenuação, para vários materiais de interesse em aplicações da geotomografia eletromagnética</i>	70
Tabela 6.1 - <i>Características das imagens reconstruídas pelas técnicas propostas</i>	108
Tabela 6.2 - <i>Características das imagens reconstruídas pelo método empregado por Dines e Lytle</i>	110

RESUMO

Título: Geotomografia Eletromagnética: Algoritmo Tomográfico, Filtro Bidimensional Adaptativo e Algoritmo de Segmentação de Imagens.

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um método eletromagnético robusto para a reconstrução de imagens de meios geofísicos. Essas imagens se denominam *geotomogramas*. Eles apresentam a distribuição espacial da condutividade elétrica e da permissividade elétrica relativa. Generaliza-se o algoritmo aditivo de Dines e Lytle, mediante a otimização de seu desempenho em relação ao nível de ruído. Desenvolve-se a versão multiplicativa desse algoritmo generalizado. Demonstra-se que os desempenhos dos algoritmos estudados são independentes de imagens homogêneas utilizadas para encetá-los. Destroi-se, portanto, a crença de que o número de iterações, os custos computacionais e os tempos de processamento sempre podem ser poupados, através do emprego de imagens iniciais homogêneas que se assemelhem às imagens reconstruídas esperadas. Propõe-se um filtro de imagens adaptativo, que impede que o processo de reconstrução iterativa apresente comportamento divergente. O filtro reduz a quantidade de artefatos nas imagens, preservando os contornos das feições reconstruídas. A quantidade de artefatos é também reduzida pelo uso de um algoritmo de segmentação iterativa de imagens, especificamente desenvolvido para essa finalidade. Nesse algoritmo, a imagem reconstruída é dividida em duas regiões: a região onde a densidade de raios é maior, que é a região que possui maior resolução, e a região restante. Retira-se da imagem esta região, e utiliza-se o processo reconstrutor na região de maior resolução. Destarte, aumenta-se ainda mais a resolução desta região. O processo é repetido, porém, desta vez, retira-se da imagem a região cuja resolução foi melhorada, a fim de aumentar a resolução da região onde a densidade de raios é menor. Ao término desta primeira iteração do algoritmo de segmentação, toda a imagem apresenta um aumento de resolução. A realização de outras iterações tende a reduzir ainda mais a quantidade de artefatos. A retirada de uma parte da imagem propicia o aumento do condicionamento sobre a parte restante, pois há uma redução na razão entre o número de incógnitas e o de condicionamentos. Para cada posição das antenas transmissora e receptora, medem-se a variação de fase com a frequência do sinal recebido e a intensidade dele em dada frequência. O algoritmo tomográfico, o filtro de imagens adaptativo e o algoritmo de segmentação de imagens utilizam esses dados para gerar um par de imagens: numa imagem, as amplitudes das células são variações do fator de fase; na outra imagem, as amplitudes das células são fatores de atenuação. Desenvolve-se um algoritmo iterativo não linear, que possui elevada taxa de convergência, para gerar os geotomogramas de condutividade elétrica e permissividade elétrica relativa, a partir das imagens do fator de atenuação e das variações do fator de fase. Propõem-se três métodos para a análise quantitativa da influência da interface solo-ar sobre os dados medidos. Ilustra-se a importância desses métodos através da análise de exemplos. O principal motivo para a realização da inversão conjunta, a partir de medições de intensidade e de variações de fase com a frequência dos sinais recebidos, é a redução na quantidade de artefatos, tanto no geotomograma de condutividade elétrica como no de permissividade elétrica relativa. Nas simulações, analisa-se a significância das feições reconstruídas, mediante comparações entre várias imagens de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa da mesma região. Propõe-se um método para a quantificar, local ou globalmente, a resolução espacial digital de imagens. Enfatiza-se a necessidade de combinar métodos de sondagem geofísica com disciplinas da área de Processamento de Informação, para caracterizar melhor regiões subterrâneas. Apresentam-se detalhadamente vários tópicos, relacionados à geotomografia eletromagnética, que poderão ser explorados futuramente.

Palavras-chaves: geoprocessamento, processamento de sinais, processamento de imagens, tomografia geofísica, segmentação de imagens, filtragem adaptativa, filtro seletivo, reconstrução de imagens, métodos eletromagnéticos, sondagem geofísica, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Title: Electromagnetic Geotomography: Tomographic Algorithm, Adaptive Two-Dimensional Filter and Image Segmentation Algorithm.

The main objective of this work is to develop a robust electromagnetic method for reconstructing images of geophysical media. Such images are called *geotomographs*. The images represent spatial distributions of the electrical conductivity and relative permittivity. The additive algorithm of Dines and Lytle is generalized by optimizing its performance with respect to the noise level. A multiplicative version of this generalized algorithm is presented. This work proves that the iterative algorithms addressed in this work perform independently of homogeneous starting images. This fact effaces the belief that the number of iterations, computational costs and processing times can always be saved by employing homogeneous starting images that resemble the expected reconstructed images. A new two-dimensional adaptive filter hinders the iterative reconstruction process from diverging even when the data set is noisy. The filter reduces the number of artifacts in the geotomographs without blurring the boundaries of the reconstructed features. Artifact degradation is also hampered by a novel iterative image-segmentation algorithm. It divides the reconstructed image into two regions: the region where resolution is best because the density of rays is highest, and the remaining region. This region is removed from the image, and the reconstruction process takes place solely in the high-resolution region. The resolution of such region is therefore further increased. The process is repeated, but this time the region whose resolution was improved is removed from the image. Hence the resolution of the low ray-density region is increased. At the end of the first iteration of the segmentation algorithm, the whole image presents improved resolution. The number of artifacts is further reduced by performing other iterations. Removing a part of the image renders the remaining part more tightly constrained owing to the reduction of the ratio between the number of unknowns and the number of constraints. The phase change with frequency of the received signal and its intensity at a single frequency are measured for each location of the transmitting and receiving antennas. Such data is used by the tomographic algorithm, the two-dimensional adaptive filter and the image-segmentation algorithm to generate a pair of images. In one image, the pixel amplitudes are phase-factor changes; in the other image, the pixel amplitudes are attenuation factors. A new non-linear iterative algorithm transforms such images into electrical conductivity and relative permittivity tomographs. The algorithm presents high convergence rate. Three methods are proposed for quantitatively assessing the influence of the ground-air interface on the measured data. The analysis of examples demonstrates the importance of such methods. Reducing the number of artifacts in the conductivity and permittivity tomographs is the main reason for performing the joint inversion from both phase changes with frequency and intensities of the received signals. In the simulations, the significance of the reconstructed features is investigated through comparisons between various conductivity and permittivity images of the probed region. A method is proposed for quantifying spatial resolution of digital images locally or globally. The need to combine information disciplines with geophysical sounding methods is underscored. This enables the probed regions to be characterized more accurately. Suggestions for future work are presented in detail.

Key words: geoprocessing, signal processing, image processing, geophysical tomography, image segmentation, adaptive filtering, selective filter, image reconstruction, electromagnetic methods, geophysical sounding, remote sensing.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONCEITOS BÁSICOS DA TOMOGRAFIA GEOFÍSICA

A geotomografia é uma técnica de prospecção de elevada resolução espacial, que permite a investigação, por sensoriamento remoto, de um meio geofísico, através do processamento de dados obtidos a partir da propagação de energia em diferentes direções no meio. A energia que cruza o meio geofísico, na maioria das aplicações da geotomografia, é de natureza acústica ou eletromagnética. Neste trabalho, utiliza-se somente a energia eletromagnética, em função das aplicações visadas. Elas são de natureza localizada, exigem elevada resolução espacial, grande versatilidade e viabilidade econômica.

Uma das possíveis geometrias utilizadas na geotomografia eletromagnética está apresentada na Fig. 1.1 (Lopes & Lopes, 1994a). Radiações eletromagnéticas partem de uma antena situada em um dos lados da região investigada e são captadas por uma antena localizada no outro lado da região. As trajetórias das radiações eletromagnéticas estão representadas por linhas retas, que ligam algumas posições da antena transmissora a algumas posições da antena receptora. O propósito da geotomografia é reconstruir imagens que representem as distribuições espaciais de algumas propriedades físicas, tais como: a condutividade elétrica e/ou a permissividade elétrica relativa de um meio geofísico. Neste trabalho, um algoritmo tomográfico robusto e versátil é proposto. Tais características tornam-no pouco sensível a ruídos e bastante adequado a reconstruções de imagens a partir de dados incompletos, o que ocorre

quando o meio não pode ser investigado a partir de todos os seus lados (Lopes & Lopes, 1991). Na geometria da Fig. 1.1, o meio geofísico é investigado apenas a partir dos seus lados direito e esquerdo. O algoritmo iterativo de reconstrução de imagens empregado opera inteiramente no espaço de sinais. Inicialmente, são realizadas estimativas da solução. Em seguida, tais estimativas são sucessivamente melhoradas pelo algoritmo tomográfico, convergindo para soluções finais consistentes com os dados considerados. As principais razões para a utilização de algoritmos iterativos, ao invés de algoritmos analíticos, na tomografia geofísica, são que os algoritmos iterativos são virtualmente independentes da geometria da região investigada e são geralmente autocorretivos (Lopes & Lopes, 1992). Em muitos casos, a geotomografia é realizada a partir de furos preexistentes ou de galerias de minas, de modo que a geometria não é sempre a da Fig. 1.1. Portanto, é idealmente desejável que o algoritmo tomográfico usado em aplicações geofísicas *in situ* seja pouco dependente da geometria em questão e seja também autocorretivo, o que reduz os problemas adversos causados pela propagação e acumulação de erros, decorrentes do processamento da grande quantidade de dados e da realização das muitas operações matemáticas envolvidas na reconstrução de imagens (Lopes & Lopes, 1993).

Uma qualidade importante do método proposto é que ele é de natureza ativa. Sinais gerados por uma fonte controlável são injetados na região investigada. As características deles podem ser minuciosamente escolhidas, para otimizar a extração das informações desejadas sobre o meio em questão. Por exemplo, se a relação sinal-ruído na recepção for muito baixa, uma das possíveis soluções para esse problema é o aumento do nível de potência entregue à antena transmissora. Degradações dos sinais recebidos, induzidas por difrações, podem ser reduzidas, aumentando-se as frequências dos sinais transmitidos (Lopes & Lopes, 1994b).

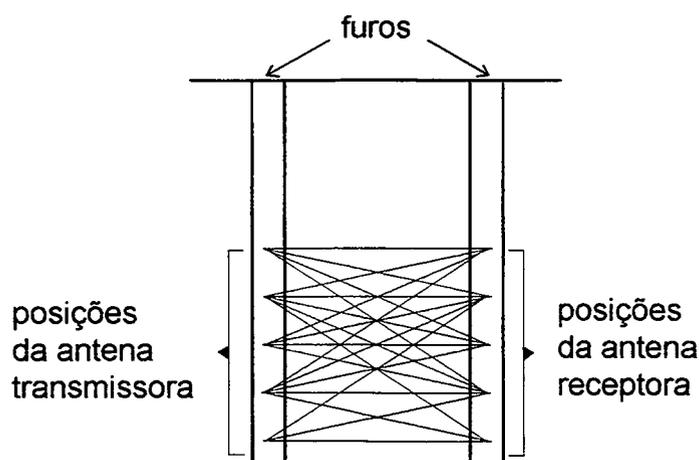


Figura 1.1 - Uma possível geometria para a geotomografia.

Algoritmos baseados na Teoria do Espalhamento podem também ser empregados para resolver o problema geotomográfico *in situ*. Eles requerem a utilização de condições simplificadoras, para a resolução da equação de onda analiticamente (Pan, 1998). Uma das condições freqüentemente consideradas é que as características eletromagnéticas do meio investigado se afastem pouco da média, o que permite o emprego das aproximações de Born e de Rytov de primeira ordem (Lopes & Lopes, 1994a). Como as anomalias do meio geofísico e as distribuições de campo eletromagnético nelas são inicialmente desconhecidas, a aproximação de Born de primeira ordem consiste em admitir que o campo dentro das anomalias é igual ao campo que nelas incide (Deming & Devaney, 1997). Conseqüentemente, a intensidade do campo espalhado deve ser pequena em comparação à do campo incidente, o que significa que as dimensões das anomalias precisam ser pequenas. A aproximação de Rytov de primeira ordem consiste em admitir que a fase do campo espalhado varia linearmente com a mudança do índice

de refração no meio investigado (Lopes & Lopes, 1994a). Portanto, tal aproximação é válida quando a mudança de fase ao longo de um comprimento de onda é pequena e as dimensões das anomalias são pequenas. Quando as dimensões das anomalias e as variações locais de velocidade da onda eletromagnética em relação à velocidade média não são suficientemente pequenas, a aproximação de Rytov de primeira ordem é geralmente melhor do que a aproximação de Born de primeira ordem. Tal fato torna a aproximação de Rytov preferível em aplicações geofísicas de campo.

Apesar dos avanços teóricos divulgados recentemente envolvendo a resolução da equação de onda, muitos dos trabalhos de campo, envolvendo a geotomografia eletromagnética, utilizam a aproximação ótica de raios retos (Haber & Oldenburg, 1997; Olsson et al., 1992). Essa aproximação permite que a geotomografia eletromagnética seja robusta, versátil e simples, adequando-se às condições práticas não ideais geralmente encontradas, como a utilização ocasional de dois ou mais furos que não estejam contidos em um mesmo plano. A utilidade prática de muitos modelos teóricos disponíveis, que consideram efeitos de difração e refração no processo geotomográfico eletromagnético *in situ*, tem sido continuamente avaliada. Ramirez (1986) realizou experimentos de campo com a geotomografia eletromagnética na faixa de 5 MHz a 40 MHz, utilizando a aproximação ótica de raios retos. Ficou então ressaltado que geotomogramas são representações bidimensionais de estruturas tridimensionais, anisotrópicas e heterogêneas. Portanto, a utilização de modelos que incluam efeitos de difração e refração, mas que apresentem ação confinada ao plano do tomograma, pode causar inconsistências mais graves no processo reconstrutor do que as causadas pelo uso da aproximação ótica de raios retos. Mesmo quando todas as posições da fonte e do receptor se encontram em um mesmo plano, as ondas eletromagnéticas captadas podem ter sido espalhadas ou refratadas por estruturas externas

ao plano em questão. Nesse caso, os tomogramas são afetados por estruturas geofísicas que nem mesmo interceptam o plano que eles representam.

Os métodos eletromagnéticos comumente usados na prospecção mineral e nas prospecções de petróleo e de água subterrânea utilizam frequências menores do que 10 kHz (Prensky, 1994). Nesse caso, as correntes de deslocamento são geralmente desprezíveis. Por outro lado, existem algumas técnicas de perfilagem eletromagnética de poços que utilizam frequências maiores do que 1 MHz (Murphy et al., 1992). Nessa situação, as correntes de deslocamento são importantes. As frequências de operação da geotomografia eletromagnética estão mais próximas das frequências usadas nas técnicas de perfilagem eletromagnética do que das frequências empregadas nos métodos eletromagnéticos de prospecção geofísica mais tradicionais.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Demeter (1997) utilizou redes neurais para a avaliação rápida de dados tomográficos. Elas forneciam os parâmetros de um ajuste não linear a dados experimentais, numa fração do tempo envolvido na realização do ajuste efetuado por um algoritmo tomográfico convencional, que utilizava o *Método dos Gradientes Conjugados*. Os resultados produzidos pelas redes neurais não foram tão corretos quanto os gerados pelo algoritmo convencional. As redes neurais foram menos versáteis do que o algoritmo convencional na resolução do problema inverso. A carga de computação envolvida no treinamento das redes neurais foi a mesma necessária para completar algumas centenas de ajustes não lineares com o algoritmo convencional. A principal conclusão do trabalho foi que o tempo necessário para treinar as redes neurais é justificável

somente se uma grande quantidade de dados tiver de ser avaliada em tempo real. O autor sugeriu que os resultados da inversão neural talvez possam ser usados como estimativa inicial da solução procurada pelo método iterativo convencional, reduzindo o tempo que esse método necessita para convergir.

Newman & Alumbaugh (1997) resolveram, de maneira iterativa, o problema inverso eletromagnético, não linear, tridimensional, geofísico, mediante atualizações sucessivas em um modelo linearizado, realizadas pelo *Método dos Gradientes Conjugados*. Empregou-se um algoritmo tridimensional de diferenças finitas para calcular, no domínio da frequência, os dados estimados e as sensibilidades do modelo. Limitações de natureza prática causaram a indeterminação do problema inverso, pois ele envolvia o cálculo dos valores de milhares de incógnitas. Os autores afirmaram que, em certas situações, a resolução do problema direto tridimensional pode envolver alguns milhões de incógnitas. Um exemplo sintético ilustrou o desempenho da técnica proposta.

Alumbaugh & Newman (1997) aplicaram a técnica de inversão tridimensional eletromagnética mencionada anteriormente à monitorização do processo de injeção de salmoura no subsolo. Os experimentos foram realizados no *campo Richmond*, localizado na Califórnia. Os testes visaram a simular não só a injeção de fluidos em reservatórios petrolíferos, mas também a infiltração de rastreadores e/ou contaminadores em aquíferos. O local continha quatro poços de monitorização, dispostos ao redor de um poço que foi usado para a injeção da salmoura. A Fig. 1.2 mostra a distribuição dos poços. A comparação entre imagens associadas a dados coletados antes e após a injeção de cinquenta mil galões de salmoura permitiu localizar as zonas de maior permeabilidade hidráulica em torno do poço central. Uma análise de resolução mostrou que a localização das zonas inundadas estava razoavelmente certa, embora a reconstrução das estruturas geológicas estivesse distorcida, devido à cobertura angular

incompleta. Esse problema se complicou pelo desvio dos poços da direção vertical, gerando artefatos nas imagens reconstruídas.

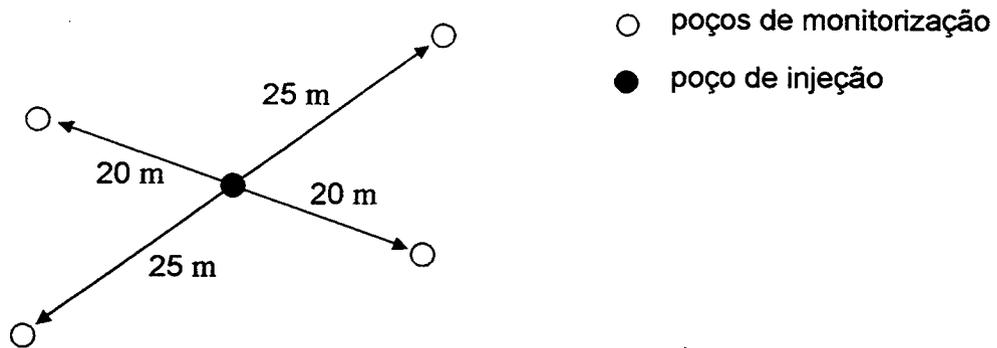


Figura 1.2 - *Distribuição dos poços no campo Richmond, na Califórnia.*

Yu & Edwards (1997) investigaram a reconstrução de um alvo condutivo, através do emprego da tomografia eletromagnética, no domínio do tempo, e no limite de difusão. O alvo se localizava entre furos. Os autores mostraram que o tempo para um sinal eletromagnético ser identificado em um receptor, após uma mudança de corrente no transmissor, é um estimador excelente e robusto da condutividade elétrica média, ao longo do caminho percorrido pelo sinal no meio investigado. Os autores deduziram o relacionamento existente entre o tempo de viagem e a condutividade elétrica, para um meio uniforme. O conceito de inversão de tempo de viagem foi aplicado à reconstrução tomográfica de alvos subterrâneos. Os resultados mostraram que este tipo de tomografia pode fornecer a localização e a forma de alvos condutivos soterrados. As imagens geradas pela *Técnica de Decomposição de Valor Singular* (SVD) não foram tão polidas quanto as imagens geradas por uma *Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea* (SIRT). Os autores constataram que o uso da *tomografia de raios curvos* não causou melhorias significativas

nas imagens reconstruídas, em comparação às imagens reconstruídas pela tomografia que empregava a aproximação de *raios retilíneos*. É interessante notar que os autores modelaram as frentes de onda por *raios*, apesar de o experimento geotomográfico envolver o limite de difusão da energia eletromagnética no meio em questão. As simulações mostraram que a modelação conduziu a resultados satisfatórios. Embora a distância entre os furos, bem como a altura da região investigada, tenha sido de cem metros, a região foi dividida em apenas 20×20 células. Os autores afirmaram que a técnica pode ser facilmente adaptada ao caso tridimensional.

Ellis & Peden (1997) efetuaram modificações no conhecido operador de retropropagação, para detectar e localizar objetos bidimensionais, soterrados, pouco dispersivos, que estejam perto da interface solo-ar. As modificações incluíram a filtragem espectral angular de onda plana e a detecção do campo espalhado com polarização cruzada. Incluiu-se nas inversões a correlação cruzada do sinal recebido com a assinatura de um alvo conhecido, para a realização de comparações. Essa correlação foi útil para a detecção dos objetos soterrados. Mostrou-se que o uso dos componentes de frequência espacial positiva dos campos espalhados pelo alvo soterrado, aliado à retropropagação dos campos espalhados polarizados verticalmente, fornecia resultados que eram relativamente insensíveis à presença da estratificação horizontal. Exemplos sintéticos ilustraram o fato de que a retropropagação pode ser usada para os propósitos de detecção e localização de alvos bidimensionais dielétricos, a partir da emissão de sinais em um furo e da recepção deles em outro furo.

Rhebergen et al. (1997) afirmaram que, em vários ramos da Engenharia, é encontrado o problema de medições que originam um conjunto incompleto de dados espectrais. A reconstrução de uma imagem a partir desse tipo de conjunto pode ser formulada em termos de uma equação integral da primeira espécie. Tal equação pode ser convertida em uma equação integral equivalente da segunda espécie. É possível resolver essa equação por um método

iterativo, baseado no *Método de Neumann*. Mostrou-se que tal expansão de Neumann é um método de redução de erro, bem como um algoritmo equivalente ao de *Papoulis-Gerchberg*, que serve para a extrapolação de sinais de banda limitada. Consegue-se também resolver a equação integral mediante o emprego de um esquema iterativo de gradientes conjugados. Demonstrou-se a convergência desse esquema. Vários exemplos numéricos foram analisados. Os autores concluíram que o esquema proposto é fácil de implementar e pode ser útil em problemas multidimensionais.

Dorren & Snieder (1997) afirmaram que a tomografia de tempo de atraso pode ser linearizada ou não linear. No primeiro caso, um erro devido à linearização é introduzido nos problemas direto e inverso. No segundo caso, a teoria empregada é mais abrangente do ponto de vista físico, mas se os dados contiverem um erro estatístico, ocorre uma polarização no modelo, induzida pela propagação não linear de erros. Os autores investigaram tal propagação em um exemplo fracamente não linear, usando a *Teoria de Perturbações de Segunda Ordem*. Isso permitiu comparar o erro de linearização com o ruído de polarização. Mostrou-se, explicitamente, que um método de inversão não linear pode não conduzir à melhor estimação dos parâmetros de modelo do que um método linearizado, dependendo da relação sinal-ruído. Mostrou-se também que, quando os dados apresentam qualidade baixa, um método de inversão linearizado costuma fornecer resultados melhores do que um método não linear.

1.3. APLICAÇÕES

A geotomografia é uma técnica poderosa para monitorar a condução de óleo em direção aos poços de produção, como resultado do emprego de técnicas de recuperações secundária ou

terciária, tais como (Wilt et al., 1997; Yonebayashi et al., 1997): combustão *in situ*, injeção de água, de dióxido de carbono e de agentes ativos de superfície. A geotomografia é adequada a essa aplicação por fornecer a resolução espacial necessária e empregar um processo de aquisição de dados versátil, que pode ser facilmente repetido para gerar imagens do reservatório antes, durante e depois dos processos de recuperação. A geotomografia eletromagnética e a geotomografia sísmica foram utilizadas para monitorar processos de recuperações de reservatórios petrolíferos, localizados nos Estados Unidos da América (Laine, 1987). Em ambos os casos, a aproximação ótica de raios retos foi empregada com sucesso. A geotomografia eletromagnética utilizou ondas de 15 MHz e 17 MHz. A potência entregue à antena transmissora foi de 100 W. O reservatório, pertencente à *Texaco*, foi sondado tomograficamente, empregando-se dois furos verticais, que distavam oito metros entre si. As profundidades das antenas nos furos variaram entre cento e cinquenta e dois metros e cento e setenta metros. O geotomograma representava uma parte da região existente entre o poço de injeção de vapor e o de produção. A distância entre esses poços era igual a 70,1 metros. O autor concluiu que a geotomografia é uma técnica valiosa para monitorar mudanças na distribuição espacial dos níveis de saturação por óleo, gás ou água das estruturas dos reservatórios, durante os processos de recuperações secundária ou terciária.

Outra importante aplicação da geotomografia eletromagnética é o auxílio à escolha dos locais a serem usados como repositórios de lixo nuclear. Deadrick et al. (1982) utilizaram a geotomografia eletromagnética com raios retos para essa finalidade. As frequências de operação variaram de 10 MHz a 100 MHz. Os autores concluíram que os geotomogramas gerados eram coerentes com medições realizadas por outras técnicas geofísicas que investigaram apenas as regiões próximas aos furos. Além disso, os geotomogramas forneceram informação adicional sobre a região localizada entre os furos. Após a instalação de um repositório de lixo nuclear, a

geotomografia é útil para garantir que o material radioativo permaneça isolado com segurança. Ela pode detectar vazamentos de material radioativo e infiltrações de água subterrânea no repositório, permitindo que ações reparadoras emergenciais sejam realizadas. É importante que o repositório seja investigado periodicamente, para detectar possíveis mudanças adversas. Tais mudanças são primordialmente induzidas pelas elevadas temperaturas dos rejeitos nucleares, afetando as dimensões das fraturas nas rochas, as pressões existentes nos poros das formações litológicas e os caminhos da água subterrânea, o que pode eventualmente ocasionar a canalização de material radioativo para as fontes de água, contaminando o meio ambiente e o Homem. A inspeção periódica de repositórios de rejeitos nucleares permite a reunião de informações, para que se determine se o tempo mínimo de funcionamento seguro dos repositórios será, como desejado, maior do que o tempo necessário para que os rejeitos se tornem inofensivos. Um aumento muito significativo do valor da permissividade elétrica pode ser causado pela infiltração de água no repositório, porquanto o valor da permissividade elétrica da água é muito elevado, comparado aos valores de permissividade elétrica da maioria dos materiais geológicos.

Olsson & Gale (1995) apresentam os resultados do *Projeto Stripa*, que foi realizado na Suécia, com a finalidade básica de estudar questões relacionadas com os repositórios de rejeitos radioativos. As geotomografias sísmicas e eletromagnética foram usadas para mapear zonas fraturadas em rochas cristalinas. Empregaram-se dados associados a ondas eletromagnéticas que percorriam até cem metros no meio geológico. A frequência das ondas era igual a 60 MHz.

Os rumos das galerias de uma mina podem ser determinados através da análise das informações obtidas por meio da geotomografia eletromagnética. Para isso, ondas eletromagnéticas são induzidas a se propagarem de uma galeria a outra, permitindo que se reúnam informações para a realização de inferências sobre a composição provável do meio investigado. Destarte, veios desconhecidos, ou perdidos por ocasião de desmoronamentos,

podem ser localizados. Ademais, a geotomografia permite a localização, por sensoriamento remoto, de rochas cristalinas, desprovidas dos recursos procurados, que, por sua dureza, podem dificultar o avanço das escavações nas galerias.

A geotomografia é útil para investigar regiões sujeitas a desmoronamentos em encostas e para caracterizar áreas propostas para construções, auxiliando projetos de Engenharia Civil. Dines & Lytle (1979) utilizaram a geotomografia eletromagnética com raios retos e frequência de operação igual a 50 MHz, para caracterizar detalhadamente uma região próxima à capital dos Estados Unidos, proposta como área de trânsito de massa subterrâneo. Eles afirmaram que os dados obtidos unicamente a partir do emprego de técnicas geofísicas tradicionais em furos fornecem informação apenas sobre a estrutura geológica próxima dos furos. Se condições geológicas inesperadas forem encontradas no meio geofísico em questão, um tipo diferente de equipamento de escavação pode ser necessário após o início das escavações, o que geralmente implica um aumento significativo de custos, por razões contratuais e atrasos, entre outras razões. Nesse caso, é patente a importância de uma técnica de prospecção do subsolo, cuja ação não se restrinja às regiões próximas dos acessos ao meio investigado (Laporte et al., 1973). A monitorização do processo de injeção de argamassa fluida no solo, para preencher furos e fraturas, é outra aplicação de geotomografia eletromagnética em Engenharia Civil. Laine et al. (1980) utilizaram a geotomografia eletromagnética com raios retos e frequência igual a 100 MHz para essa finalidade, obtendo excelentes resultados. As inferências sobre o meio geofísico, feitas pela geotomografia eletromagnética, foram confirmadas por escavações subsequentes realizadas no mesmo meio.

A geotomografia é útil na detecção de vazamentos e infiltrações em repositórios de lixo químico, na localização de túneis e de cavernas subterrâneas (Côte et al., 1995; Ellis & Peden, 1997), e na investigação não invasiva de sítios arqueológicos, fornecendo, por

sensoriamento remoto, valiosas informações, com elevada resolução, sobre as disposições geométricas, as localizações e, possivelmente, sobre os estados de fósseis e de monumentos subterrâneos, entre outras aplicações.

Côte et al. (1995) utilizaram a geotomografia eletromagnética para caracterizar o local onde a fundação de um pilar de viaduto seria construída. A frequência empregada foi 200 MHz. A distância entre os furos era igual a doze metros. Cada furo penetrou catorze metros no meio geológico. Os dados usados na inversão tomográfica foram colhidos a partir de cinco metros de profundidade, porque, em profundidades menores do que esta, a influência da superfície do solo sobre os dados era significativa.

A largura da região investigada através da geotomografia eletromagnética depende principalmente das características elétricas da região, das frequências empregadas, da potência do transmissor, da blindagem do cabo que alimenta a antena transmissora e da sensibilidade do equipamento de recepção dos sinais. Ramirez (1986) afirmou que, em experimentos realizados no Parque Nacional de Yosemite, ondas eletromagnéticas, cujas frequências estavam entre 10 MHz e 50 MHz, chegaram a atravessar trezentos e vinte e seis metros de uma formação granítica. Somerstein et al. (1984) utilizaram a geotomografia eletromagnética, para monitorar o processo de retorta em um reservatório próximo à cidade de DeBeque, no Colorado. Cada imagem reconstruída representava a mesma região em momentos distintos. A largura da região era igual a noventa metros. A frequência das ondas eletromagnéticas era 1,5 MHz. Consideraram-se retilíneas as trajetórias das ondas eletromagnéticas através do reservatório petrolífero. Os autores afirmaram que as relações sinal-ruído dos dados são bastante aumentadas, quando os sinais recebidos são transmitidos até a superfície por fibras óticas, e quando se emprega um transmissor portátil, que se mova juntamente com a antena transmissora dentro do furo. Se o transmissor ficar na superfície do solo, ligado à antena por um cabo

coaxial, o cabo irradia sinais que podem degradar substancialmente os dados. O emprego de fibras óticas reduz a ocorrência de perdas e de interferências.

1.4. A ANTENA LINEAR CURTA EM UM MEIO COM PERDAS

Determina-se o campo eletromagnético associado a um dipolo elétrico curto, para a situação em que a antena se encontra em um meio homogêneo infinito, com condutividade elétrica σ , permeabilidade magnética μ e permissividade elétrica ϵ . A antena está mostrada na Fig. 1.3. O comprimento s é muito pequeno, comparado ao comprimento de onda λ , $s \ll \lambda$. As placas nas extremidades do dipolo curto permitem que a corrente seja uniforme, ao longo de todo o comprimento da antena. Considera-se que o vetor corrente elétrica seja harmônico (Eyrard et al., 1973): $\mathbf{I} = I_0(\cos \omega t)\hat{\mathbf{z}}$, onde I_0 é o valor de pico da corrente elétrica, no domínio do tempo; ω é a frequência angular, t é o tempo; e $\hat{\mathbf{z}}$ é o vetor unitário na direção do eixo z , mostrado na Fig. 1.3. Admite-se que as placas e a linha de transmissão não irradiem campos de intensidade significativa. O diâmetro d do dipolo é muito pequeno, comparado ao seu comprimento s , $d \ll s$.

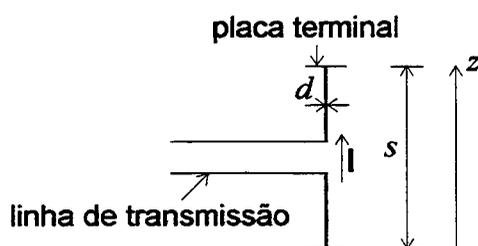


Figura 1.3 - O dipolo elétrico curto com excitação central.

As equações de Maxwell, para a excitação harmônica, são (Sadiku, 1994):

$$\nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{H} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\mathbf{E} \quad (1.1)$$

e

$$\nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}, \quad (1.2)$$

onde \mathbf{E} e \mathbf{H} são os campos elétrico e magnético, respectivamente. Considera-se que o dipolo elétrico curto esteja localizado na origem do sistema de coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) , apresentado na Fig. 1.4. A simetria do problema permite concluir que o campo magnético só possui o componente H_{ϕ} , e que o campo elétrico só possui os componentes E_r e E_{θ} . Conseqüentemente, as equações (1.1) e (1.2) podem ser expressas, em coordenadas esféricas, como:

$$\frac{\partial}{\partial r}(rE_{\theta}) - \frac{\partial}{\partial \theta}E_r = -j\omega\mu r H_{\phi}, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(\text{sen}\theta H_{\phi}) = (\sigma + j\omega\varepsilon)r \text{sen}\theta E_r, \quad (1.4)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial r}(rH_{\phi}) = -(\sigma + j\omega\varepsilon)rE_{\theta}. \quad (1.5)$$

Essas equações são válidas em todo lugar, exceto na antena. Combinando-se as equações (1.3)–(1.5), pode-se escrever

$$r \frac{\partial^2}{\partial r^2}(rH_{\phi}) + \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{1}{\text{sen}\theta} \frac{\partial}{\partial \theta}(\text{sen}\theta H_{\phi}) = \gamma^2 r^2 H_{\phi}, \quad (1.6)$$

onde $\gamma = [(\sigma + j\omega\varepsilon)j\mu\omega]^{1/2}$ é o fator de propagação (Lopes & Lopes, 1989). Admite-se que a solução dessa equação apresente a forma:

$$H_{\phi} = F(r) \text{sen}\theta. \quad (1.7)$$

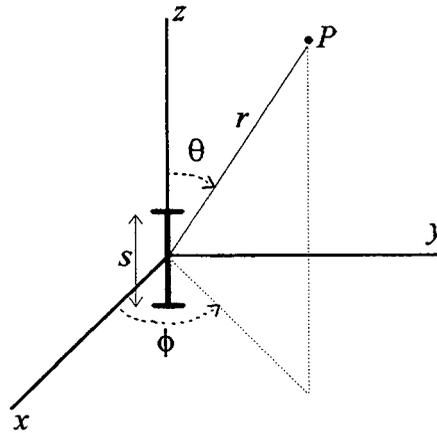


Figura 1.4 - O dipolo elétrico curto, localizado na origem de um sistema de coordenadas esféricas.

Substituindo-se H_ϕ , dado pela equação (1.7), na equação (1.6), obtém-se

$$r \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rF) - 2F = \gamma^2 r^2 F,$$

cujas soluções são

$$F(r) = \left(\frac{A}{r^2} \right) (1 \pm \gamma r) \exp(\mp \gamma r),$$

onde A é uma constante. A única solução plausível fisicamente é

$$F(r) = \left(\frac{A}{r^2} \right) (1 + \gamma r) \exp(-\gamma r), \tag{1.8}$$

porque ela permite que, para $\text{Re} \gamma > 0$, F tenda a anular-se, quando r tende a infinito.

Substituindo-se $F(r)$, dado pela equação (1.8), na equação (1.7), e fazendo-se $|\gamma r|$ tender a zero, para determinar H_ϕ sob condições quase-estáticas, obtém-se

$$H_{\phi} = \left(\frac{A}{r^2} \right) \text{sen } \theta. \quad (1.9)$$

A Lei de Biot e Savart (Sadiku, 1994) só é válida quando a frequência é muito baixa. A aplicação dessa lei para determinar o campo magnético em um ponto P , que diste r de um dipolo elétrico curto, conforme mostra a Fig. 1.4, fornece o seguinte resultado:

$$H_{\phi} = \frac{I_0 s}{4 \pi r^2} \text{sen } \theta. \quad (1.10)$$

Comparando-se as equações (1.9) e (1.10), pode-se deduzir o valor de A : $A = \frac{I_0 s}{4 \pi}$. Utilizando-se esse valor e as equações (1.7) e (1.8), pode-se escrever a seguinte expressão para o campo magnético:

$$H_{\phi} = \frac{I_0 s}{4 \pi r^2} \text{sen } \theta (1 + \gamma r) \exp(-\gamma r). \quad (1.11)$$

Obviamente, essa expressão se reduz à equação (1.10), se $|\gamma r|$ tender a zero. Pode-se demonstrar que a expressão (1.11) satisfaz a equação (1.6), que é válida até mesmo para condições não estáticas.

Os componentes do campo elétrico podem ser determinados, substituindo-se a equação (1.11) nas equações (1.4) e (1.5). Os resultados são os seguintes:

$$E_r = \frac{I_0 s \cos \theta}{2 \pi (\sigma + j \omega \epsilon)} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{\gamma}{r^2} \right) \exp(-\gamma r)$$

e

$$E_{\theta} = \frac{I_0 s \text{sen } \theta}{4 \pi (\sigma + j \omega \epsilon)} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{\gamma}{r^2} + \frac{\gamma^2}{r} \right) \exp(-\gamma r). \quad (1.12)$$

Na região de Fraunhofer, a distância r é grande o suficiente para que o componente radial do campo elétrico seja considerado desprezível, $E_r \cong 0$, e o componente transversal E_θ , dado pela equação (1.12), seja aproximado pela seguinte expressão:

$$E_\theta = \frac{I_0 \omega j s \mu}{4 \pi r} \exp(-\gamma r) \sin \theta. \quad (1.13)$$

1.5. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um método eletromagnético robusto para reconstruir, com resolução elevada, imagens de meios geofísicos. Como esse objetivo se enquadra predominantemente nas áreas de *Processamento de Sinais e de Imagens*, não há a preocupação de investigar detalhadamente o desempenho da tomografia geofísica eletromagnética em uma aplicação específica. As descrições sucintas de algumas aplicações visam a esclarecer que o método proposto é útil; portanto, ele não é um desenvolvimento teórico, pouco comprometido com a realidade. O método é especialmente adequado às aplicações da geotomografia eletromagnética que requeiram resolução espacial elevada. Ele procura estabelecer um compromisso entre simplicidade e precisão. O emprego de modelos muito sofisticados, porém pouco testados, pode induzir inconsistências mais graves na reconstrução de imagens de meios geofísicos do que as inconsistências induzidas pelo emprego de modelos simples, mas que são confiáveis. Existem modelos muito sofisticados, que descrevem as interações entre ondas eletromagnéticas e meios geofísicos, cuja utilidade prática é bastante restrita. Tais modelos geralmente só são aplicáveis em poucos meios geofísicos, demandam medições que costumam ser difíceis de efetuar e admitem a existência de condições que frequentemente não são satisfeitas em expedições geofísicas reais. A aplicabilidade desses

modelos geralmente pouco ultrapassa a realidade virtual das simulações computacionais; por isso, eles tendem a ser rejeitados nas pesquisas de campo.

A originalidade do trabalho resulta parcialmente da superação de algumas limitações observadas em métodos geotomográficos eletromagnéticos, empregados em aplicações que exigem resolução espacial elevada. A originalidade não é construída sobre o pretexto de “apresentar soluções diferentes das existentes”. As soluções propostas são viáveis, tanto do ponto de vista físico como do econômico. Outros objetivos são:

- 1) justificar a utilidade do método de reconstrução de imagens proposto;
- 2) enfatizar as qualidades e as limitações da geotomografia eletromagnética;
- 3) esclarecer que todo o instrumental envolvido é disponível comercialmente;
- 4) divulgar a geotomografia;
- 5) demonstrar que os desempenhos de certos algoritmos tomográficos iterativos são independentes de imagens homogêneas utilizadas para encetá-los;
- 6) propor um filtro de imagens adaptativo, que dispensa a prescrição de parâmetros;
- 7) propor um algoritmo tomográfico;
- 8) propor uma generalização do célebre algoritmo de Dines e Lytle;
- 9) propor um método que permita avaliar as influências da interface solo-ar e de outras interfaces sobre os sinais captados por antenas localizadas no subsolo;
- 10) esclarecer em quais situações o emprego da geotomografia eletromagnética é preferível ao emprego do radar de subsuperfície;
- 11) apresentar um novo critério de avaliação de resoluções local ou global de imagens reconstruídas;
- 12) propor um algoritmo não linear robusto, que apresenta elevada taxa de convergência, para determinar os parâmetros elétricos de uma região, a partir da medição da

magnitude de um sinal eletromagnético em dada frequência e da medição do deslocamento de fase do sinal entre duas frequências;

13) propor um tipo de tomografia, denominado *tomografia de segmentação*.

O trabalho poderia abordar a utilização da geotomografia em apenas uma aplicação, como a monitorização dos processos de recuperações secundária ou terciária de reservatórios petrolíferos. Entretanto, como o objetivo principal do trabalho se encontra principalmente nas áreas de *Processamento de Imagens e de Sinais*, propõe-se um método geotomográfico que é útil em diversas aplicações. Dessa forma, a importância do trabalho é justificada mais amplamente.

CAPÍTULO 2

DETERMINAÇÕES DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E DA PERMISSIVIDADE ELÉTRICA RELATIVA DE MEIOS HOMOGÊNEOS

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, calcula-se a magnitude do sinal recebido, para quaisquer orientações dos eixos das antenas lineares, desde que eles estejam dispostos em um mesmo plano. Admite-se que a antena receptora esteja na região de campo distante da antena transmissora. A excitação é harmônica. Propõe-se um algoritmo iterativo não linear, que determina a condutividade elétrica e a permissividade elétrica relativa de um meio homogêneo. O algoritmo requer o conhecimento do deslocamento, entre duas frequências, da fase do sinal recebido, bem como o conhecimento da magnitude do sinal captado na frequência mais baixa, que é a frequência associada à maior relação sinal-ruído. Uma simulação computacional ilustra o desempenho do algoritmo.

Utiliza-se a Ótica Geométrica para facilitar a descrição das trajetórias das ondas eletromagnéticas no meio investigado. Expressam-se analiticamente as condições necessárias para que as aproximações da Ótica Geométrica sejam válidas.

2.2. O ALGORITMO NÃO LINEAR

Utilizando-se as relações $\gamma = \alpha + j\beta$ e $\omega = 2\pi f$ (Sadiku, 1994), pode-se escrever a equação (1.13) da seguinte forma:

$$E_{\theta} = \frac{I_0 f j s \mu_0}{2L} \exp(-\alpha L) \exp(-j\beta L) \text{sen } \theta, \quad (2.1)$$

onde:

$$\alpha = \frac{\pi f}{c} \left\{ 2\epsilon_r \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r f} \right)^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.2)$$

é o fator de atenuação (Lopes & Lopes, 1989);

$$\beta = \frac{\pi f}{c} \left\{ 2\epsilon_r \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r f} \right)^2 \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

é o fator de fase (Lopes & Lopes, 1989);

$\epsilon_0 = 8,854185 \times 10^{-12}$ F/m é a permissividade elétrica do espaço livre;

$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ é a permissividade elétrica relativa do meio;

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade do espaço livre;

$c = (\mu_0\epsilon_0)^{-1/2} \cong 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no espaço livre;

L é a distância entre a antena transmissora e a antena receptora, conforme mostra a Fig. 2.1.

Utilizou-se $\mu = \mu_0$, na equação (2.1), porque os valores de permeabilidade da maioria dos meios geológicos são muito próximas da do espaço livre (Lopes, 1998).

Na geometria da Fig. 2.1, considera-se que as antenas transmissora e receptora sejam dipolos elétricos curtos idênticos. Elas estão contidas em um mesmo plano, e estão alinhadas aos eixos z e z' , respectivamente. A equação (2.1) pode ser escrita vetorialmente da seguinte forma: $E_{\theta} \hat{\theta}$, onde $\hat{\theta}$ é o vetor unitário na direção de θ , conforme mostra a Fig. 2.2. θ é o ângulo entre o eixo z e o raio-vetor L . O sentido crescente de θ é o horário. A projeção do

vetor campo elétrico $E_\theta \hat{\theta}$ na direção da antena receptora, isto é, na direção do eixo z' , possui magnitude dada por: $|E_\theta| \text{sen}(\theta + \varphi)$. Utilizando-se a equação (2.1), pode-se escrever a seguinte expressão para $|E_\theta| \text{sen}(\theta + \varphi)$:

$$|E'(L)| = |E_\theta| \text{sen}(\theta + \varphi) = \frac{I_0 s f \mu_0 \exp(-\alpha L) |(\text{sen} \theta) \text{sen}(\theta + \varphi)|}{2L} \quad (2.4)$$

Se as antenas transmissora e receptora estiverem paralelas, então $\varphi = 0$. Nesse caso, a equação (2.4) reduz-se a

$$|E'(L)| = \frac{I_0 s f \mu_0 \exp(-\alpha L)}{2L} \text{sen}^2 \theta.$$

A situação em que os furos apresentados na Fig. 2.1 são paralelos é muito usada em simulações computacionais que envolvem a geotomografia (Bois et al., 1971; Lopes & Lopes, 1989; Nemeth et al., 1997). Na prática, a intensidade do campo elétrico medido pela antena receptora pode ser expressa da seguinte forma:

$$|E'(L)| = \frac{G f \exp(-\alpha L) |(\text{sen} \theta) \text{sen}(\theta + \varphi)|}{L}, \quad (2.5)$$

onde o fator G depende principalmente do produto $I_0 s \mu_0$, das características elétricas da antena receptora, e da forma como for realizado o acoplamento entre as antenas e o meio (Alexander & Salter, 1997). G pode ser determinado experimentalmente, através de medições de $|E'(L)|$, em um meio em que o fator de atenuação α seja conhecido (Garn et al., 1997). É importante mencionar que G não depende teoricamente dos ângulos θ e φ . Isolando-se o fator de atenuação, na equação (2.4), obtém-se

$$\alpha = \frac{\ln \left[\frac{Gf |\sin \theta \sin(\theta + \varphi)|}{L |E'(L)|} \right]}{L} \quad (2.6)$$

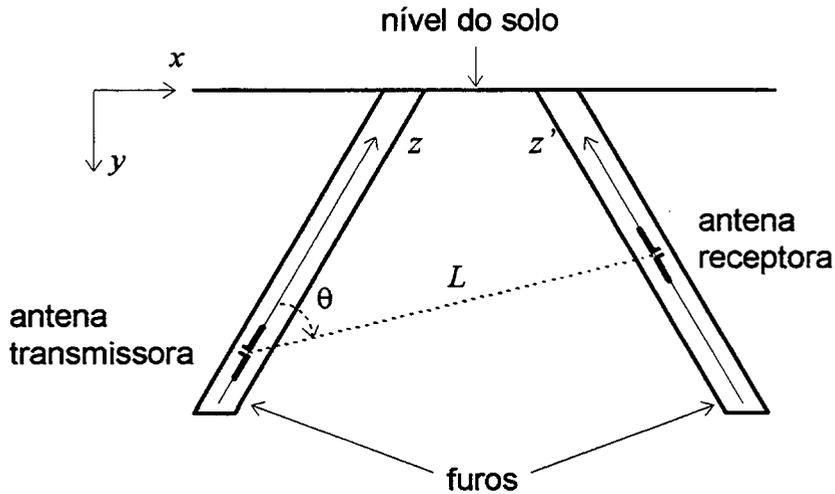


Figura 2.1 - Uma geometria que permite a utilização do método geotomográfico proposto. Os furos estão inclinados propositalmente, para ilustrar a versatilidade do método.

A partir da equação (2.1), pode-se expressar da forma seguinte a variação da fase do campo elétrico na antena receptora, quando a frequência de operação varia de f_1 a f_2 , sendo $f_2 > f_1$ (Lopes & Lopes, 1989):

$$\Delta\phi = (\beta_2 - \beta_1)L, \quad (2.7)$$

onde β_2 e β_1 são, respectivamente, os fatores de fase associados às frequências f_2 e f_1 .

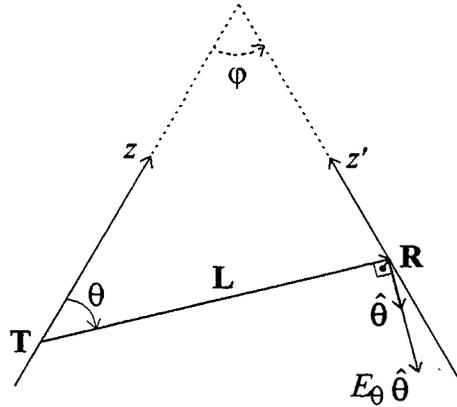


Figura 2.2 - Diagrama esquemático da Fig. 2.1. **T** e **R** indicam, respectivamente, as localizações das antenas transmissora e receptora. $\hat{\theta}$ é o vetor unitário na direção de θ . ϕ é o ângulo entre os eixos z e z' . O sentido crescente de ϕ é o anti-horário.

Combinando-se as equações (2.2) e (2.3), pode-se expressar $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ da forma seguinte:

$$\Delta\beta = \left[\alpha_2^2 - \left(\frac{2\pi f_2}{c} \right)^2 \epsilon_r \right]^{1/2} - \left[\alpha_1^2 + \left(\frac{2\pi f_1}{c} \right)^2 \epsilon_r \right]^{1/2}, \quad (2.8)$$

onde α_2 e α_1 são, respectivamente, os fatores de atenuação associados às frequências f_2 e f_1 .

Isolando-se a permissividade elétrica relativa, na equação (2.8), obtém-se

$$\varepsilon_r = \left[\frac{c}{2\pi a} \right]^2 \left\{ (\Delta\beta)^2 b + a(\alpha_1^2 - \alpha_2^2) + 2(\Delta\beta) \left[(\Delta\beta)^2 (f_1 f_2)^2 + a(f_2^2 \alpha_1^2 - f_1^2 \alpha_2^2) \right]^{1/2} \right\}, \quad (2.9)$$

onde:

$$a = f_2^2 - f_1^2$$

e

$$b = f_2^2 + f_1^2.$$

A partir da equação (2.2), pode-se escrever α_2^2 em função de α_1 :

$$\alpha_2^2 = \frac{f_2 \left[(\alpha_1 c)^4 + (2\pi \alpha_1 c f_1)^2 \varepsilon_r + (2\pi^2 f_1 f_2 \varepsilon_r)^2 \right]^{1/2} - 2f_1 (\pi f_2)^2 \varepsilon_r}{f_1 c^2}, \quad (2.10)$$

onde α_1 é calculado utilizando-se a equação (2.6) com a frequência f_1 . Isolando-se a condutividade elétrica na equação (2.2), e utilizando-se a frequência f_1 , obtém-se

$$\sigma = \frac{\alpha_1 \left[(\alpha_1 c)^2 + (2\pi f_1)^2 \varepsilon_r \right]^{1/2}}{\pi \eta_0 f_1}, \quad (2.11)$$

onde $\eta_0 = (c\varepsilon_0)^{-1} \cong 376,730313 \Omega$ é a impedância intrínseca do espaço livre (Sadiku, 1994).

A condutividade elétrica e a permissividade elétrica relativa de um meio homogêneo são obtidas pelo algoritmo descrito a seguir:

- 1) determina-se α_1 , usando-se a equação (2.6);
- 2) determina-se $\Delta\beta$, a partir da equação (2.7);
- 3) admite-se que α_2^2 é igual a α_1^2 ;
- 4) calcula-se ε_r , utilizando-se a equação (2.9);
- 5) calcula-se α_2^2 , usando-se, na equação (2.10), o valor de ε_r encontrado no passo 4;

- 6) repetem-se conjuntamente os passos 4 e 5, até que esse processo iterativo convirja para um valor estável de ϵ_r ;
- 7) calcula-se σ , empregando-se, na equação (2.11), o valor de ϵ_r encontrado no passo 6.

É importante ressaltar que esse algoritmo não utiliza a amplitude do sinal recebido de frequência f_2 . Os dados necessários são a amplitude do sinal recebido de frequência f_1 e a variação de fase do sinal recebido, causada pela mudança de frequência entre f_1 e f_2 . O exemplo apresentado a seguir visa a ilustrar o comportamento convergente do algoritmo não linear proposto.

Exemplo 2.1. Admite-se que a condutividade elétrica e a permissividade elétrica relativa do meio investigado sejam 0,01 S/m e 25, respectivamente. Esses valores são típicos de solos úmidos, nas faixas de frequências médias e altas (Lopes & Lopes, 1992). As frequências de operação são $f_1 = 12$ MHz e $f_2 = 14$ MHz. Utilizando-se a equação (2.2), conclui-se que $\alpha_1 = 0,362026$ Np/m. Deduz-se que $\Delta\beta = 0,203366$ rad/m, a partir da aplicação da equação (2.8). Empregando-se o algoritmo proposto, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 2.1. Observa-se que o algoritmo proposto apresenta elevada taxa de convergência, pois, em apenas três iterações, o erro percentual no valor da permissividade elétrica relativa tornou-se desprezível. Utilizando-se, na equação (2.11), o valor de ϵ_r encontrado na terceira iteração do algoritmo, ou seja, $\epsilon_r = 25,000010$, obtém-se $\sigma = 1,000000 \times 10^{-2}$ S/m. Esse valor de condutividade elétrica apresenta discrepância desprezível em relação ao valor verdadeiro. Uma razão para a elevada velocidade de convergência do algoritmo é o emprego de uma boa estimativa inicial para o quadrado do fator de atenuação associado à frequência f_2 , conforme indica o terceiro passo do algoritmo.

Tabela 2.1 - O comportamento convergente do algoritmo não linear proposto.

$$f_1 = 12 \text{ MHz}, f_2 = 14 \text{ MHz}, \alpha_1 = 0,362026 \text{ Np/m e } \Delta\beta = 0,203366 \text{ rad/m.}$$

ITERAÇÃO	PERMISSIVIDADE ELÉTRICA RELATIVA CALCULADA PELO ALGORITMO PROPOSTO	ERRO PERCENTUAL NA PERMISSIVIDADE ELÉTRICA RELATIVA
1	25,196971	0,79%
2	25,001373	$5,49 \times 10^{-3}\%$
3	25,000010	$3,80 \times 10^{-5}\%$

2.3. APROXIMAÇÕES DA ÓTICA GEOMÉTRICA

As trajetórias das radiações eletromagnéticas em um meio geofísico, cujas dimensões são relativamente pequenas, podem ser aproximadas por raios retos, quando as seguintes condições são satisfeitas (Lopes & Lopes, 1992):

- a) a antena receptora se encontra na região de Fraunhofer da antena transmissora;
- b) as variações espaciais do índice de refração complexo são pequenas.

A primeira condição pode ser expressa analiticamente por $|\gamma L| \gg 1$, onde γ é o fator de propagação, que foi empregado na equação (1.6), e L é a distância entre as antenas. Expressando-se essa condição em função dos parâmetros elétricos constitutivos do meio geofísico, obtém-se

$$L \gg (2\pi\mu_0 f)^{-1/2} [\sigma^2 + (2\pi\epsilon_0\epsilon_r f)^2]^{-1/4} \quad (2.12)$$

Essa condição é menos restritiva, para os maiores valores de frequência, de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa. A condição é facilmente satisfeita, na maioria das aplicações da geotomografia eletromagnética. Aplicando-se a expressão (2.12), para $\sigma = 0,01 \text{ S/m}$, $\epsilon_r = 25$ e $f = 12 \text{ MHz}$, conclui-se que a separação entre as antenas deve ser muito maior do que apenas setenta e quatro centímetros. Esses valores de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa são típicos de solos úmidos, nas faixas de frequências médias e altas.

A segunda condição implica que a *variação espacial* da velocidade de propagação da energia eletromagnética seja pequena, ao longo de um comprimento de onda. Essa velocidade é dada por (Lopes & Lopes, 1992)

$$v = 2c \left\{ 2\epsilon_r \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r f} \right)^2 \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{-1/2}, \quad (2.13)$$

e o comprimento de onda é expresso por $\lambda = v/f$. Se a frequência da onda eletromagnética for 12 MHz, e a onda estiver se propagando em solo úmido, com as características elétricas mencionadas anteriormente, então se conclui, pela utilização da equação (2.13), que $v = 0,19c$ e $\lambda = 4,80 \text{ m}$. Como os espalhamentos, as reflexões e as refrações da onda eletromagnética, nas regiões próximas da região de interesse, podem influenciar as medições, a segunda condição deve ser satisfeita na região de interesse, *bem como em suas imediações*.

Lopes & Lopes (1994b) apresentam um algoritmo capaz de determinar as frequências de operação de qualquer método eletromagnético de sensoriamento remoto. A Transformada de Fourier permite a realização de análises espectrais. Ela possibilita a identificação dos componentes harmônicos que mais influenciam o sinal analisado (Gerken, 1989). Portanto, a

aplicabilidade do algoritmo proposto por Lopes e Lopes é extensiva aos métodos eletromagnéticos de sensoriamento remoto que não envolvam frequências explicitamente, como os métodos que empregam pulsos ou aqueles que incluem fenômenos de relaxação. Turner & Siggins (1994) transmitiram pulsos eletromagnéticos através de uma formação granítica. Uma antena localizada em um furo emitia os pulsos, que eram captados por uma antena localizada em outro furo. Os autores efetuaram uma análise espectral, tanto para um pulso que percorreu o caminho direto entre as antenas transmissora e receptora, quanto para um pulso que sofreu reflexão na interface solo-ar. Observou-se que o componente harmônico cuja frequência era igual a 79 MHz dominava o pulso que percorreu o caminho direto. O pulso que sofreu reflexão na interface solo-ar era dominado pelo componente harmônico cuja frequência era igual a 55 MHz. Lopes & Lopes (1994b) ilustraram a utilidade do algoritmo que eles desenvolveram para a determinação de frequências de operação de métodos eletromagnéticos de sensoriamento remoto, através da análise de uma sondagem eletromagnética geotomográfica real, que visava à monitorização do processo de recuperação terciária de um reservatório petrolífero. A generalidade do algoritmo proposto por Lopes e Lopes advém do fato de ele envolver somente as leis físicas básicas que governam a propagação de ondas eletromagnéticas, bem como do fato de a maioria dos sinais envolvidos em sondagens eletromagnéticas de meios geofísicos poder ser satisfatoriamente expressa pela soma de componentes harmônicas.

CAPÍTULO 3

RECONSTRUÇÕES DE IMAGENS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E DE PERMISSIVIDADE ELÉTRICA RELATIVA DE MEIOS HETEROGÊNEOS

3.1. INTRODUÇÃO

O célebre algoritmo de Dines e Lytle (Dines & Lytle, 1979) é aditivo. Isso significa que as correções às amplitudes das células são efetuadas, em cada iteração, através de somas. Neste capítulo, apresenta-se uma generalização desse algoritmo. O algoritmo aditivo generalizado tem a capacidade de otimizar seu desempenho em relação ao nível de ruído. Apresenta-se também um novo algoritmo tomográfico, que pode ser entendido como *a versão multiplicativa generalizada do célebre algoritmo de Dines e Lytle*. O meio investigado é dividido em elementos bidimensionais, conhecidos como *células*. Cada porção do meio sondado, representada por uma célula, é considerada homogênea. Conseqüentemente, o algoritmo não linear, apresentado na seção 2.2, é aplicável a cada célula. Uma das principais qualidades do algoritmo tomográfico desenvolvido é que ele não necessita das distâncias percorridas em cada célula pelas trajetórias das ondas eletromagnéticas. O cálculo dessas distâncias, além de requerer um esforço computacional considerável, pode não ser justificável do ponto de vista geofísico, principalmente nas aplicações em que as trajetórias das ondas eletromagnéticas sejam longas. Analisa-se a sensibilidade das medidas às amplitudes das células, e conclui-se que a qualidade

dos geotomogramas melhora quando o algoritmo tomográfico enfatiza as informações associadas às trajetórias curtas.

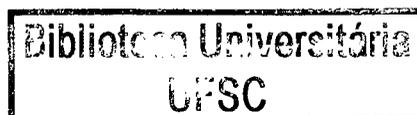
Para evitar que o algoritmo tomográfico iterativo divirja, emprega-se, entre suas iterações, um novo filtro passa-baixas bidimensional. Como o filtro apresenta natureza seletiva, ele preserva os contornos das feições reconstruídas. Selecionaram-se judiciosamente alguns resultados de simulações computacionais, para ilustrar a superioridade do desempenho desse filtro em relação ao filtro empregado por Dines e Lytle. Esses resultados estão apresentados na seção 3.3.

Apresentam-se duas técnicas de redução de artefatos em geotomogramas. A primeira delas consiste em reconstruir imagens de uma parte do meio geofísico maior do que a parte de interesse, para que esta parte seja reconstruída na região dos geotomogramas onde a resolução espacial é maior. A segunda técnica é a generalização de um procedimento usado para aumentar a resolução de tomogramas do coração humano. A técnica consiste em dividir um geotomograma em duas regiões, e continuar o processo de reconstrução, isoladamente, numa região e depois na outra. Esse processo é repetido iterativamente. Mostra-se como ocorre parte da propagação das informações das medidas durante a resolução do problema inverso.

Sintetiza-se o método de reconstrução de imagens desenvolvido. Ele é composto pelo algoritmo tomográfico, pelo filtro de imagens, pela técnica de redução de artefatos e pelo algoritmo não linear apresentado na seção 2.2. Demonstra-se analiticamente que o algoritmo original de Dines e Lytle, o algoritmo generalizado de Dines e Lytle e a versão multiplicativa deste algoritmo são independentes de imagens homogêneas usadas para encetá-los. Destrói-se assim a crença de que o número de iterações, os custos computacionais e os tempos de processamento sempre são poupados, quando se empregam imagens homogêneas que se assemelham às imagens reconstruídas esperadas. O fato de que o algoritmo de Dines e Lytle tem

sido bastante utilizado e estudado por vários pesquisadores ressalta a importância da descoberta de sua independência em relação a imagens iniciais homogêneas.

Embora o método proposto seja adequado às reconstruções bidimensionais, ele pode ser muito facilmente estendido às reconstruções tridimensionais. Isso é conseguido simplesmente acrescentando-se a variável correspondente à terceira dimensão espacial, nas equações que contêm as variáveis associadas às outras duas dimensões. As células bidimensionais dos geotomogramas, conhecidas como *pixéis*, se transformariam em elementos de volume, chamados *voxéis* (“volume elements”).



3.2. O ALGORITMO TOMOGRÁFICO

Quando o meio geofísico não é homogêneo, ele é dividido em elementos homogêneos, conhecidos como *células*, conforme mostra a Fig. 3.1. A cada célula se associa um par ordenado (i, j) , e a cada trajetória da onda eletromagnética, entre os pontos de emissão e os de recepção, um número k é associado. l_{ijk} expressa o comprimento da trajetória k na célula (i, j) .

O algoritmo tomográfico proposto é virtualmente aplicável a reconstruções de imagens cujas células apresentem qualquer forma ou qualquer tamanho. Isso não significa que o desempenho do algoritmo seja independente da forma ou do tamanho das células empregadas. Admite-se que a porção do meio geofísico associada a cada célula seja não somente homogênea, mas também linear e isotrópica. A linearidade significa que os parâmetros elétricos constitutivos do meio geofísico não dependem da intensidade do campo eletromagnético (Quek et al., 1998; Yap et al., 1998). Quando a frequência da onda eletromagnética, emitida por uma antena dipolo curto, varia de f_1 até f_2 , a variação total da fase do sinal captado pela antena receptora é dada

pela soma das variações de fase ocorridas em cada célula cruzada pela trajetória genérica k . Portanto, a partir da equação (2.7), pode-se escrever (Lopes & Lopes, 1992):

$$\Delta\phi_k = \sum_i \sum_j \Delta\beta_{ij} l_{ijk} . \quad (3.1)$$

Escrevendo-se a equação (2.6) de forma discreta e utilizando-se a frequência f_1 , obtém-se

$$\ln \left[\frac{G f_1 |\sin\theta_k \sin(\theta_k + \phi)|}{L_k |E'(L_k)|} \right] = \sum_i \sum_j \alpha_{1ij} l_{ijk} . \quad (3.2)$$

onde L_k é o comprimento do raio k . As equações (3.1) e (3.2) conduzem a resultados satisfatórios, se as condições para a utilização da aproximação ótica de raios retos, apresentadas na seção 2.3, forem respeitadas. A obediência a essas condições assegura que o modo de propagação dominante é aproximadamente uma linha reta entre as antenas transmissora e receptora. Conseqüentemente, reflexões, refrações e difrações são, nesse caso, necessariamente fenômenos secundários. Nos meios estratificados em que as variações espaciais do índice de refração complexo são significativas, a segunda condição para a utilização da aproximação ótica de raios retos é desrespeitada, e, portanto, um modelo mais abrangente do que o apresentado neste trabalho precisa ser empregado. Felizmente, existem muitas situações em que as condições mencionadas são satisfeitas (Dines & Lytle, 1979; Haber & Oldenburg, 1997; Laine, 1987; Olsson et al., 1992; Ramirez, 1986; Sandberg et al., 1991).

Na Fig. 2.1, as posições das antenas transmissora e receptora são respectivamente dadas, em coordenadas cartesianas, pelos vetores $\mathbf{T} = (x_T, y_T)$ e $\mathbf{R} = (x_R, y_R)$. Portanto, o comprimento de cada raio, que é usado na equação (3.2), é facilmente determinado por meio de

$L = \|\mathbf{T} - \mathbf{R}\| = \left[(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2 \right]^{1/2}$. Se os furos forem verticais, isto é, paralelos ao eixo y , então $(x_T - x_R)^2$ é igual ao quadrado do espaçamento entre os furos, D^2 , quaisquer que

sejam as localizações das antenas nos furos. Conseqüentemente, pode-se escrever para esse

caso: $L = \left[D^2 + (y_T - y_R)^2 \right]^{1/2}$. Muitas simulações computacionais realizadas indicaram que o

emprego dessa simplificação, no cálculo dos comprimentos dos raios, reduz sensivelmente o tempo de processamento, pois o número de trajetórias tipicamente envolvido em experimentos geotomográficos pode atingir os milhares (Dines & Lytle, 1979).

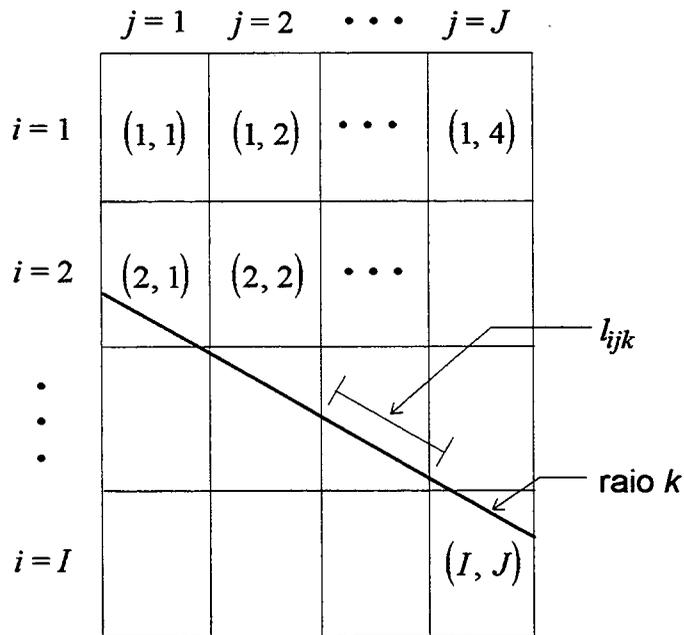


Figura 3.1 - Divisão do meio investigado em células. l_{ijk} é a distância que o raio k percorre na célula (i, j) . O número de células é dado pelo produto $I \times J$.

A aplicação das equações (3.1) e (3.2) a todas as trajetórias origina dois sistemas lineares de equações, cujos coeficientes são as distâncias l_{ijk} percorridas por cada trajetória em cada

célula, e as incógnitas são os fatores de atenuação e as variações do fator de fase. Os valores medidos são as variações de fase com a frequência do sinal recebido, $\Delta\phi$, e a intensidade do campo elétrico de frequência f_1 , $|E'(L)|$. Destarte, os membros esquerdos das equações (3.1) e (3.2) são conhecidos, para cada trajetória k . A notação vetorial é comumente usada para facilitar a descrição de algoritmos tomográficos. O vetor incógnita é dado por $\mathbf{x} = [x_{11}, x_{21}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{IJ}]$, onde os componentes são os valores de $\Delta\beta_{ij}$, quando a equação (3.1) é empregada. Os componentes do vetor \mathbf{x} são os valores de α_{ij} , quando a equação (3.2) é usada. O número total de células é dado pelo produto $I \times J$. $\mathbf{l}_k = [l_{11k}, l_{21k}, \dots, l_{ijk}, \dots, l_{Ijk}]$ é o vetor composto pelas distâncias que o percurso genérico k cruza em cada célula. Os valores conhecidos, dados pelos membros esquerdos das equações (3.1) e (3.2), podem ser expressos pelo produto escalar entre o vetor incógnita e o vetor dos coeficientes:

$$y_k = \mathbf{x} \cdot \mathbf{l}_k. \quad (3.3)$$

y_k é chamado *raio-soma*, porque y_k é a forma discreta de uma integral de linha, calculada ao longo da trajetória que liga o ponto de emissão do sinal ao ponto de recepção (Lopes & Lopes, 1994a).

O raio-soma reconstruído após n iterações do algoritmo tomográfico é dado por $y_k^n = \mathbf{x}^n \cdot \mathbf{l}_k$, onde \mathbf{x}^n é o vetor cujos componentes são as amplitudes das células após n iterações. Neste trabalho, as amplitudes das células são os fatores de atenuação associados à frequência f_1 e as variações do fator de fase com a frequência. Se as condições para a utilização das aproximações da Ótica Geométrica forem satisfeitas, então se pode esperar que a

maior parte dos componentes do vetor \mathbf{x}^n assumam valores próximos. Portanto, a seguinte aproximação é válida (Dines & Lytle, 1979):

$$\mathbf{x}^n \cdot \mathbf{l}_k \cong \left[\frac{\sum_i \sum_j x_{ij}^n \operatorname{sgn}(l_{ijk})}{N_k} \right] L_k, \quad (3.4)$$

onde se admite que l_{ijk} é nulo para as células que não são atravessadas pelo raio k , N_k é o número de células atravessadas pelo raio k , e $\operatorname{sgn}(l_{ijk})$ é a função sinal, dada por

$$\operatorname{sgn}(l_{ijk}) = \begin{cases} -1, & l_{ijk} < 0; \\ 0, & l_{ijk} = 0; \\ 1, & l_{ijk} > 0. \end{cases}$$

Na aplicação envolvida neste trabalho, a função sinal não assume o valor -1 , porque as distâncias l_{ijk} são obviamente maiores ou iguais a zero. O termo entre colchetes, no membro direito da equação (3.4), é a média aritmética das amplitudes reconstruídas das células cruzadas pelo raio k , após n iterações do algoritmo de reconstrução de imagens. O membro direito da equação (3.4) é uma aproximação para o raio-soma calculado. O valor dessa aproximação é dividido pelo raio-soma medido, y_k , a fim de permitir a comparação entre eles:

$$F_k^n = \frac{L_k}{N_k y_k} \sum_i \sum_j x_{ij}^n \operatorname{sgn}(l_{ijk}). \quad (3.5)$$

F_k^n é um indicador das modificações que as amplitudes reconstruídas das células atravessadas pelo raio k devem sofrer, na iteração n , para permitir a satisfação do condicionamento imposto pelo dado y_k . Se F_k^n for maior do que a unidade, então se admite que os valores das amplitudes reconstruídas das células atravessadas pelo raio k estão mais elevados do que

deveriam. Os valores das amplitudes das células devem ser aumentados, se F_k^n for menor do que a unidade. Eles não devem ser alterados, quando F_k^n for igual à unidade.

Como geralmente há várias trajetórias que cruzam cada célula, existem vários valores de F_k^n associados a cada célula. Propõe-se, neste trabalho, a atualização do valor da amplitude da célula (i, j) , na iteração n , através de uma média ponderada de valores de F_k^n associados às trajetórias que cruzem tal célula:

$$F_{ij}^n = \frac{\sum_k F_k^n \frac{\text{sgn}(l_{ijk})}{N_k^\tau}}{\sum_k \frac{\text{sgn}(l_{ijk})}{N_k^\tau}}, \quad (3.6)$$

onde τ é uma variável inteira positiva, usada para acelerar a convergência do algoritmo tomográfico. Embora o valor de τ que origine a melhor reconstrução possa não ser inteiro, o uso de valores inteiros de τ é justificado pela redução da carga de processamento computacional. Na equação (3.6), observa-se que os pesos da média ponderada, $\frac{\text{sgn}(l_{ijk})}{N_k^\tau}$, decrescem com o aumento do número de células cruzadas pela trajetória k . Isso é feito para reduzir a influência das trajetórias mais longas no processo de reconstrução (Lopes & Lopes, 1993). Os sinais que partem da antena transmissora sofrem reduções em suas amplitudes devido a espalhamentos e absorções no meio investigado. Quanto maior a distância percorrida por uma onda eletromagnética em um meio geofísico, maior a atenuação sofrida pela onda. Por essa razão, as trajetórias mais curtas geralmente estão associadas a maiores relações sinal-ruído do que as trajetórias mais longas (Lopes & Lopes, 1991). Esse fato torna a informação associada às trajetórias curtas mais confiável do que a informação associada às trajetórias longas.

Além disso, a sensibilidade do raio-soma, associado a uma trajetória curta, em relação às amplitudes das células é geralmente maior do que a de uma trajetória longa. Se os furos apresentados na Fig. 2.1 forem paralelos ao eixo y , então as trajetórias curtas são horizontais ou quase assim, e o número de trajetórias longas, que são as trajetórias inclinadas, é maior do que o de trajetórias curtas. Devido ao espectro angular mais amplo do conjunto de trajetórias longas, tal conjunto é mais sensível aos efeitos da anisotropia elétrica (Lopes & Lopes, 1992; Ramirez, 1986). Essa conclusão é válida, independentemente das direções das interfaces que possam existir no meio sondado. O desvio padrão da distribuição de ângulos de trajetórias é maior para o conjunto de trajetórias longas do que para o conjunto de trajetórias curtas. Como é geralmente bastante complexa a resolução de problemas inversos que incluam o fenômeno da anisotropia, redes neurais têm sido usadas para solucionar tais problemas (Jones et al., 1998). A redução das informações associadas às trajetórias longas, durante a resolução do problema inverso, implica maior adequação do modelo à realidade geofísica, porque os efeitos da anisotropia elétrica não são levados em conta pelo modelo utilizado neste trabalho. Outro motivo para efetuar essa redução é o fato de a aproximação da trajetória da onda eletromagnética por uma linha reta, que liga a antena transmissora à antena receptora, tender a ser mais satisfatória para uma trajetória curta do que para uma trajetória longa, porque esta, ao atravessar um meio geofísico, geralmente sofre mais refração do que aquela.

A amplitude da célula (i, j) é atualizada por

$$x_{ij}^{n+1} = \frac{x_{ij}^n}{F_{ij}^n}. \quad (3.7)$$

Substituindo-se nessa relação o valor de F_{ij}^n , dado pela equação (3.6), e utilizando-se o valor de F_k^n , dado pela equação (3.5), obtém-se

$$x_{ij}^{n+1} = x_{ij}^n \frac{\sum_k \operatorname{sgn}(l_{ijk}) N_k^{-\tau}}{\sum_k \left[L_k y_k^{-1} N_k^{-(1+\tau)} \sum_i \sum_j x_{ij}^n \operatorname{sgn}(l_{ijk}) \right] \operatorname{sgn}(l_{ijk})}. \quad (3.8)$$

A equação (3.8) é um algoritmo tomográfico. Essa equação é usada para cada célula da imagem, a partir de uma estimativa inicial, que é expressa vetorialmente por $\mathbf{x}^0 = [x_{11}^0, x_{21}^0, \dots, x_{ij}^0, \dots, x_{IJ}^0]$. A primeira iteração termina quando uma nova estimativa para toda a imagem é gerada. Tal estimativa é representada pelo vetor \mathbf{x}^1 . O processo é repetido, partindo desta vez de \mathbf{x}^1 . Geralmente, várias iterações são necessárias até que $|x_{ij}^{n+1} - x_{ij}^n|$ seja suficientemente pequeno para a maioria absoluta de células, quando se pode sustar o processo reconstrutor. O algoritmo expresso pela equação (3.8) é multiplicativo (Lopes et al., 1997a), porque a amplitude de cada célula na iteração n , x_{ij}^n , está relacionada com a respectiva amplitude atualizada, x_{ij}^{n+1} , por meio de um fator $(F_{ij}^n)^{-1}$, conforme mostra a equação (3.7). Infelizmente, a utilização da aproximação para o raio-soma reconstruído, dada pela equação (3.4), pode causar a *divergência do processo iterativo sintetizado pela equação (3.8)*. Tal processo considera que *todas* as amplitudes de células cruzadas por um raio k contribuem *com igual importância* para o valor do respectivo dado medido y_k . Como essa contribuição uniformizada não ocorre verdadeiramente, inconsistências são introduzidas no processo reconstrutor. O acúmulo dessas inconsistências, com o passar das iterações, nem sempre pode ser contrabalançado pela natureza autocorretiva do algoritmo iterativo proposto, o que explica a possibilidade de divergência do algoritmo. Dines & Lytle (1979) tentaram impedir que o algoritmo proposto por eles divergisse, através do emprego de um filtro de imagens. Nas seções 3.3 e 3.4, serão apresentadas técnicas úteis para a redução da possibilidade de divergência

do algoritmo expresso pela equação (3.8). A escolha adequada do valor de τ contribui para essa redução.

A sensibilidade de y_k em relação a x_{ij} mede a variação relativa em y_k , induzida por uma variação relativa em x_{ij} . Ela é dada por (Lopes & Lopes, 1993):

$$S_{x_{ij}}^{y_k} = \frac{\partial y_k}{\partial x_{ij}} \frac{x_{ij}}{y_k} = \frac{l_{ijk} x_{ij}}{y_k} \quad (3.9)$$

Esse resultado indica que quanto maior a distância l_{ijk} que a trajetória k cruza na célula (i, j) , maior é a influência da amplitude x_{ij} sobre o valor do dado medido y_k . As imagens reconstruídas pelo algoritmo expresso pela equação (3.8) poderiam ter resolução maior, se os

pesos da média ponderada dada pela equação (3.6) fossem $\frac{l_{ijk}}{N_k^\tau}$, em vez de $\frac{\text{sgn}(l_{ijk})}{N_k^\tau}$. Estes

pesos fazem com que o processo reconstrutor conceda *a mesma importância* aos condicionamentos impostos por trajetórias que cruzam *distâncias pequenas ou grandes na mesma célula*. É patente que o raio-soma associado a uma trajetória cuja interseção com uma célula é grande contém mais informação sobre a zona correspondente do meio geofísico do que o raio-soma associado a uma trajetória que atravessa uma distância pequena nessa zona (Lopes & Lopes, 1992). A equação (3.9) mostra que o dado medido, y_k , é mais sensível às amplitudes das células atravessadas pelo raio k , quando y_k é menor. As trajetórias mais curtas geralmente estão associadas aos menores valores de y_k , porque, neste caso, o vetor \mathbf{l}_k apresenta mais componentes nulos. Os valores dos pesos usados na equação (3.6) são maiores para as trajetórias mais curtas, o que contribui para o aumento da resolução das imagens reconstruídas. É mais difícil para os ruídos e as inconsistências do modelo empregado obliterarem a informação

sobre a amplitude de uma célula, se tal informação estiver presente em dados cuja sensibilidade a essa amplitude seja elevada. Como esses dados são mais confiáveis, a colocação de ênfase sobre eles, durante a resolução dos problema inverso, causa uma redução apreciável na quantidade de artefatos presentes nos geotomogramas.

As deficiências do algoritmo tomográfico proposto apresentam duas causas: a aproximação expressa pela equação (3.4) e o tipo de peso usado na média ponderada dada pela equação (3.6). Em ambos os casos, evitou-se, intencionalmente, empregar as distâncias que as trajetórias cruzam nas células, pelos seguintes motivos:

- a) o cálculo dessas distâncias requer razoável esforço computacional, o que se torna patente, quando se lembra que o número de células ou de trajetórias envolvido em um experimento geotomográfico real pode atingir os milhares (Newman & Alumbaugh, 1997);
- b) se as distâncias forem calculadas apenas uma vez, e depois forem armazenadas, então há a necessidade de grande quantidade de memória;
- c) o emprego de distâncias, no algoritmo tomográfico, tende a aumentar o tempo e o custo do processo reconstrutor;
- d) o cálculo das distâncias pode não ser justificável, porque geralmente as verdadeiras trajetórias das ondas eletromagnéticas no meio geofísico não são retilíneas.

O algoritmo tomográfico sintetizado na equação (3.8) pode ser entendido como *a versão multiplicativa generalizada do famoso algoritmo de Dines e Lytle* (Dines & Lytle, 1979; Lopes et al., 1997a). A generalização é justificada pelo fato de a variável τ , na equação (3.8), poder ser diferente de quatro, o que não acontece no algoritmo de Dines e Lytle. A mudança do valor de τ permite otimizar o comportamento do algoritmo de reconstrução de imagens (Lopes & Lopes, 1992; Lopes & Lopes, 1994a). Se o nível de ruído esperado, associado à inversão, for

elevado, então melhores imagens costumam ser reconstruídas quando τ é igual a dois. Para níveis baixos de ruído esperado, recomenda-se que τ seja igual a quatro. Uma vantagem do algoritmo proposto sobre o algoritmo de Dines e Lytle é o fato de a natureza multiplicativa daquele algoritmo resultar na aplicação automática do condicionamento de positividade (Matson, 1998) das quantidades reconstruídas durante o processo iterativo. Conseqüentemente, se todos os dados forem positivos, então o algoritmo proposto jamais poderá associar valores negativos ou nulos às amplitudes das células. Essa característica contribui para regularizar a resolução do problema inverso.

3.3. O FILTRO DE IMAGENS

Dines & Lytle (1979) tentaram reduzir a possibilidade de o algoritmo iterativo proposto por eles divergir, através da realização de uma filtragem passa-baixas entre as iterações do algoritmo. Realiza-se essa filtragem pelo uso de uma janela composta de, no máximo, nove células. A janela é deslocada por toda a extensão da imagem, atribuindo-se à amplitude de cada célula o valor da média aritmética das amplitudes originais de todas as células contidas na janela. Para uma célula localizada em qualquer uma das bordas da imagem, a janela é composta por essa célula e por todas as células que lhe são contíguas. Nesse caso, o número de células da janela é inferior a nove. A filtragem realizada por Dines e Lytle geralmente borra os contornos das feições das imagens, e pode, até mesmo, torná-los imperceptíveis. A fim de reduzir esses problemas nas imagens reconstruídas pelo algoritmo expresso pela equação (3.8), propõe-se, a seguir, um filtro que realiza o processo de polimento pela escolha de células vizinhas à célula cuja amplitude deve ser modificada, e que provavelmente pertencem à mesma feição que essa

célula. A Fig. 3.2(a) apresenta uma janela composta de 3×3 células. A célula central da janela é a célula (i, j) , onde i e j indicam, respectivamente, a linha e a coluna da imagem associadas à célula, de acordo com a convenção estabelecida na Fig. 3.1. A janela é dividida em subjanelas, conforme mostra a Fig. 3.2(b). Qualquer subjanela contém a célula (i, j) . O sentido crescente da numeração das subjanelas é o anti-horário. Há quatro subjanelas na Fig. 3.2(b).

O processo de filtragem proposto é descrito pelos passos apresentados a seguir (Lopes et al., 1997b).

- 1) Calcula-se, para cada subjanela, a média aritmética dos módulos das diferenças entre a amplitude de cada célula e a amplitude da célula a ser modificada, ou seja, x_{ij} :

$$D_1 = \frac{|x_{i,j+1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i,j+1}) + |x_{i-1,j+1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i-1,j+1}) + |x_{i-1,j} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i-1,j})}{\operatorname{sgn}(x_{i,j+1}) + \operatorname{sgn}(x_{i-1,j+1}) + \operatorname{sgn}(x_{i-1,j})}, \quad (3.10)$$

$$D_2 = \frac{|x_{i-1,j} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i-1,j}) + |x_{i-1,j-1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i-1,j-1}) + |x_{i,j-1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i,j-1})}{\operatorname{sgn}(x_{i-1,j}) + \operatorname{sgn}(x_{i-1,j-1}) + \operatorname{sgn}(x_{i,j-1})}, \quad (3.11)$$

$$D_3 = \frac{|x_{i,j-1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i,j-1}) + |x_{i+1,j-1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i+1,j-1}) + |x_{i+1,j} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i+1,j})}{\operatorname{sgn}(x_{i,j-1}) + \operatorname{sgn}(x_{i+1,j-1}) + \operatorname{sgn}(x_{i+1,j})}, \quad (3.12)$$

$$D_4 = \frac{|x_{i+1,j} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i+1,j}) + |x_{i+1,j+1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i+1,j+1}) + |x_{i,j+1} - x_{i,j}| \operatorname{sgn}(x_{i,j+1})}{\operatorname{sgn}(x_{i+1,j}) + \operatorname{sgn}(x_{i+1,j+1}) + \operatorname{sgn}(x_{i,j+1})}. \quad (3.13)$$

Admite-se, sem perda de generalidade, que: as células localizadas fora dos limites da imagem apresentem amplitudes nulas, e as amplitudes de todas as células da imagem não sejam negativas. Essas suposições são frequentemente encontradas em trabalhos que envolvem processamento de imagens (Gerwe & Plonus, 1998). Se o denominador de alguma das equações (3.10)–(3.13) for nulo, então a subjanela correspondente só contém a célula (i, j) .

Nesse caso, a equação em questão torna-se indeterminada, pois o seu numerador é necessariamente nulo. Tal fato não ocorre, se a célula (i, j) não estiver localizada na borda da imagem. O denominador de cada uma das quatro equações anteriores indica o número de células contidas na subjanela correspondente menos um. Portanto, cada denominador só pode assumir os seguintes valores: 0, 1, 2 e 3.

2) Calcula-se, para cada janela, o menor valor entre D_1, D_2, D_3 e D_4 :

$$M = \min(D_1, D_2, D_3, D_4).$$

Determina-se assim a subjanela que mais se identifica com a célula (i, j) .

3) Determina-se a subjanela mais parecida com a subjanela selecionada no passo 2.

Se $M = D_1$, então $N = \min(D_2, D_4)$. Se $M = D_2$, então $N = \min(D_1, D_3)$.

Se $M = D_3$, então $N = \min(D_2, D_4)$. Se $M = D_4$, então $N = \min(D_1, D_3)$.

A partir da determinação das variáveis M e N , conhecem-se as duas subjanelas selecionadas para processamentos posteriores. Se a célula (i, j) não estiver na extremidade da imagem, então a união das duas subjanelas selecionadas sempre origina um bloco com 2×3 ou 3×2 células. Esse algoritmo não permite a união de subjanelas dispostas diagonalmente. Isso significa que as subjanelas 1 e 3 não se unem, e as subjanelas 2 e 4 também não se unem. Destarte, evita-se a união de duas subjanelas que, por estarem relativamente afastadas, apresentam poucas chances de pertencerem à mesma região da imagem.

4) Calcula-se a nova amplitude da célula (i, j) . Essa amplitude é a média aritmética de todas as amplitudes de células contidas no bloco criado no passo 3, excetuando-se a amplitude original da célula (i, j) . Se o bloco for formado pela união das subjanelas 1 e 2, então o novo valor da amplitude da célula (i, j) é

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i,j+1} + x_{i-1,j+1} + x_{i-1,j} + x_{i-1,j-1} + x_{i,j-1}}{\text{sgn}(x_{i,j+1}) + \text{sgn}(x_{i-1,j+1}) + \text{sgn}(x_{i-1,j}) + \text{sgn}(x_{i-1,j-1}) + \text{sgn}(x_{i,j-1})}. \quad (3.14)$$

Para as subjanelas 1 e 4, o novo valor da amplitude da célula (i, j) é

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i,j+1} + x_{i-1,j+1} + x_{i-1,j} + x_{i+1,j} + x_{i+1,j+1}}{\text{sgn}(x_{i,j+1}) + \text{sgn}(x_{i-1,j+1}) + \text{sgn}(x_{i-1,j}) + \text{sgn}(x_{i+1,j-1}) + \text{sgn}(x_{i+1,j+1})}. \quad (3.15)$$

Para as subjanelas 2 e 3, obtém-se

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i-1,j} + x_{i-1,j-1} + x_{i,j-1} + x_{i+1,j-1} + x_{i+1,j}}{\text{sgn}(x_{i-1,j}) + \text{sgn}(x_{i-1,j-1}) + \text{sgn}(x_{i,j-1}) + \text{sgn}(x_{i+1,j-1}) + \text{sgn}(x_{i+1,j})}. \quad (3.16)$$

O novo valor da amplitude da célula (i, j) é o seguinte, para o bloco formado pelas subjanelas 3 e 4:

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i,j+1} + x_{i,j-1} + x_{i+1,j-1} + x_{i+1,j} + x_{i+1,j+1}}{\text{sgn}(x_{i,j+1}) + \text{sgn}(x_{i,j-1}) + \text{sgn}(x_{i+1,j-1}) + \text{sgn}(x_{i+1,j}) + \text{sgn}(x_{i+1,j+1})}. \quad (3.17)$$

Os denominadores de cada uma das equações (3.14)–(3.17) sempre assumem o valor *cinco*, se a célula (i, j) não estiver na borda da imagem. O conhecimento desse fato facilita o emprego dessas equações. As equações (3.14)–(3.17) não utilizam a amplitude original da célula (i, j) , x_{ij} , pelos seguintes motivos.

- a) Se x_{ij} não diferir significativamente das amplitudes das outras células contidas no bloco criado no terceiro passo do algoritmo de filtragem proposto, então a inclusão de x_{ij} no cálculo de x'_{ij} mudaria muito pouco o valor de x'_{ij} . Essa mudança não justifica o acréscimo correspondente na carga de processamento computacional. Tal acréscimo pode ser significativo, porque há muitas células nas imagens; a filtragem pode ser realizada várias vezes durante o processo iterativo de reconstrução de imagens, a fim de impedir a divergência do algoritmo tomográfico sintetizado pela equação (3.8); e a filtragem precisa ser efetuada não só durante a inversão do sistema

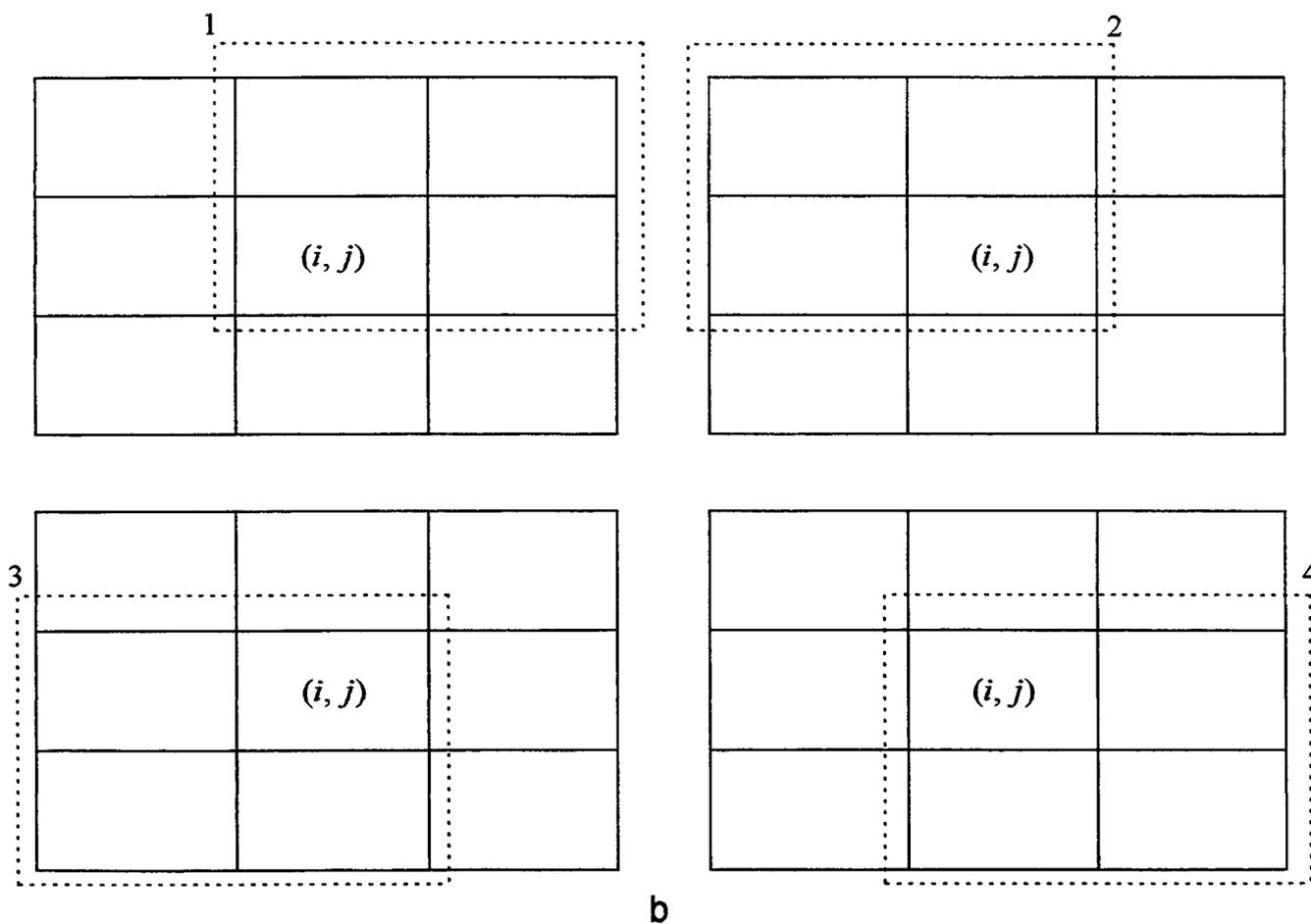
de equações resultante da aplicação da equação (3.1) a todos os raios, mas também quando se aplica a equação (3.2) a todas as trajetórias.

- b) Se x_{ij} diferir significativamente das amplitudes das outras células contidas no bloco criado no terceiro passo do algoritmo de filtragem, então a inclusão de x_{ij} no cálculo de x'_{ij} provavelmente afetaria a imagem adversamente, porquanto a célula (i, j) apresentaria possibilidades relativamente elevadas de fazer parte de alguma feição espúria, isto é, um *artefato*.

Basicamente, a filtragem da imagem é realizada trocando-se cada valor de amplitude de célula por um novo valor, x'_{ij} , que é dependente das amplitudes de algumas células vizinhas. O valor original da amplitude da célula (i, j) , isto é, x_{ij} , é utilizado para determinar as células da vizinhança que provavelmente pertencem à mesma região da imagem do que a célula (i, j) . Cada nova amplitude de célula é imediatamente incorporada à imagem, após sua determinação. As formas compactas das equações (3.10)–(3.17) estão apresentadas no Anexo. O filtro proposto pode ser facilmente ampliado para o caso tridimensional. A filosofia de funcionamento do filtro bidimensional desenvolvido é também aplicável a janelas que contenham mais do que 3×3 pixels. É conhecido o fato de que os filtros de imagem adaptativos geralmente fornecem resultados melhores do que os resultados obtidos através do uso de filtros de imagem que não são adaptativos. Essa afirmação tem sido respaldada através de medidas objetivas, bem como através de medidas subjetivas (Rangayyan et al., 1998). Muitos filtros de imagem requerem o preestabelecimento de parâmetros, tais como limiares de disparo, coeficientes e frequências espaciais de corte (Sjöberg & Noharet, 1998). Uma característica importante do filtro desenvolvido é que ele prescinde da prescrição de parâmetros. Ademais, ele não requer a mudança de domínio dos sinais processados, o que resulta na dispensação do emprego de ferramentas matemáticas para a realização de passagens de um domínio para o outro. Uma dessas ferramentas é a Transformada de Fourier (Matson, 1998).

$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$
$(i, j-1)$	(i, j)	$(i, j+1)$
$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$

a



b

Figura 3.2 - O filtro de imagens. (a) A janela composta de 3×3 de células. (b) Divisão da janela em subjanelas. Há quatro subjanelas, indicadas pelas linhas tracejadas. Todas as subjanelas contêm a célula (i, j) .

Apresentam-se, a seguir, dois exemplos, que ilustram o emprego do filtro de imagens proposto. A Fig. 3.3 apresenta a imagem original da distribuição de condutividade elétrica de um meio geofísico simulado, a sua reconstrução e a legenda. O algoritmo tomográfico utilizado para a reconstrução da imagem apresentada na Fig. 3.3(a) é descrito por Lopes & Lopes (1992). Os dados foram corrompidos por ruídos, para simular os efeitos de refrações, difrações e interferências das ondas eletromagnéticas, bem como os efeitos causados nos geotomogramas pelas discrepâncias entre o modelo empregado e a realidade física. Cada símbolo no geotomograma está associado a algum valor no intervalo da legenda que contenha o mesmo símbolo. A fim de facilitar a demonstração do uso do filtro, admite-se que cada símbolo no geotomograma esteja associado ao valor central do respectivo intervalo da legenda. Assim, considera-se que as células que contenham aspas (") possuam amplitudes iguais a $0,22 \times 10^{-3}$ S/m, que é o valor central do intervalo $[0,10 \times 10^{-3}$ S/m, $0,33 \times 10^{-3}$ S/m]. Aos símbolos =, # e * atribuem-se, respectivamente, os valores $0,44 \times 10^{-3}$ S/m, $0,66 \times 10^{-3}$ S/m e $0,89 \times 10^{-3}$ S/m. Esses valores centrais estão também associados aos símbolos do meio geofísico apresentado na Fig. 3.3(a).

Exemplo 3.1. A célula (i, j) analisada neste exemplo está indicada pelo número 1, na Fig. 3.3(b). Para essa célula, i é igual a 15 e j é igual a 18. A comparação entre as Figs. 3.3(a) e 3.3(b) permite concluir que a amplitude reconstruída da célula (15, 18) está degradada. Utilizando-se as equações (3.10)–(3.13), para $x_{15\ 18} = 0,22 \times 10^{-3}$ S/m, encontram-se os seguintes resultados: $D_1 = 0,22 \times 10^{-3}$ S/m, $D_2 = 0,22 \times 10^{-3}$ S/m, $D_3 = 0,52 \times 10^{-3}$ S/m e $D_4 = 0,52 \times 10^{-3}$ S/m. De acordo com os passos 2 e 3 do algoritmo de filtragem desenvolvido,

o bloco deve ser construído pela união das subjanelas 1 e 2. Utilizando-se a equação (3.14), conclui-se que a nova amplitude da célula (15, 18) é $x'_{15\ 18} = 0,44 \times 10^{-3}$ S/m, cujo símbolo correspondente da legenda é =. O filtro usado por Dines e Lytle conduz a $x'_{15\ 18} = 0,57 \times 10^{-3}$ S/m. Tal amplitude corresponde ao símbolo #, que não é o símbolo que deve ser associado ao pixel em questão. A natureza seletiva do filtro de imagens proposto é a razão para a superioridade de seu desempenho em relação ao do filtro usado por Dines e Lytle.

Exemplo 3.2. Neste exemplo, analisa-se a célula (18, 2), que está indicada pelo número 2, na Fig. 3.3(b). Utilizando-se as equações (3.10)–(3.13), para $x_{18\ 2} = 0,89 \times 10^{-3}$ S/m, encontram-se os seguintes resultados: $D_1 = 0,30 \times 10^{-3}$ S/m, $D_2 = 0,38 \times 10^{-3}$ S/m, $D_3 = 0,15 \times 10^{-3}$ S/m e $D_4 = 0,08 \times 10^{-3}$ S/m. O bloco deve ser construído pela união das subjanelas 3 e 4. Empregando-se a equação (3.17), obtém-se $x'_{18\ 2} = 0,80 \times 10^{-3}$ S/m, cujo símbolo correspondente é *. Como o filtro desenvolvido não alterou significativamente a amplitude da célula (18, 2), não houve mudança do símbolo que o algoritmo tomográfico atribuíra originalmente a essa célula. A comparação entre as Figs. 3.3(a) e 3.3(b) permite concluir que a amplitude da célula (18, 2) não estava degradada antes da filtragem. Após a filtragem, não houve degradação. Entretanto, há degradação, se o filtro passa-baixas usado por Dines e Lytle for empregado. Ele fornece o seguinte valor para a amplitude da célula (18, 2): $x'_{18\ 2} = 0,69 \times 10^{-3}$ S/m, cujo símbolo correspondente é #. Este exemplo evidencia a tendência que o filtro usado por Dines e Lytle tem de borrar os contornos das feições que compõem a imagem. O filtro bidimensional proposto não possui tal tendência.

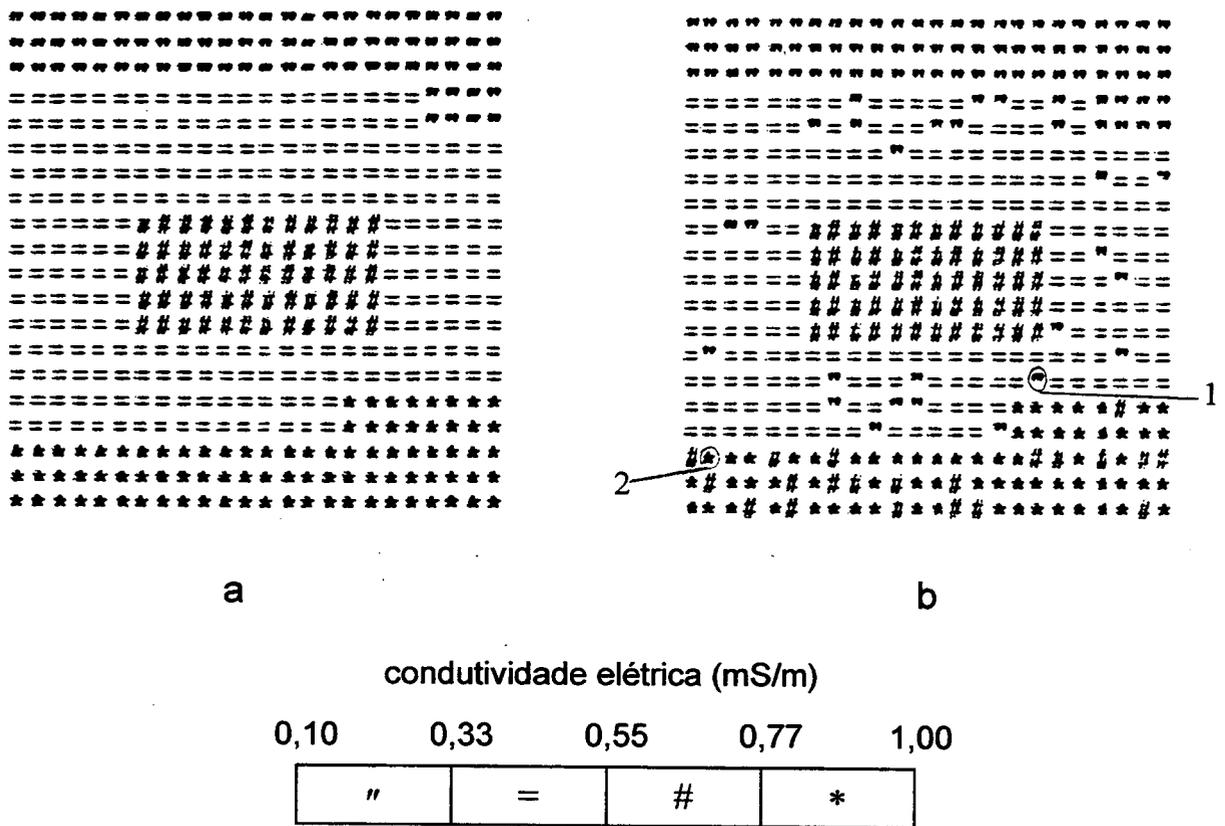


Figura 3.3 - O funcionamento do filtro de imagens proposto. (a) A imagem original da distribuição de condutividade elétrica de um meio geofísico simulado. (b) A imagem reconstruída do meio geofísico apresentado. Este geotomograma foi gerado por meio do algoritmo geotomográfico descrito por Lopes & Lopes (1992). Ilustra-se o funcionamento do filtro bidimensional desenvolvido através de dois exemplos. Os exemplos 3.1 e 3.2 versam sobre as células indicadas pelos números 1 e 2, respectivamente.

3.4. TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE ARTEFATOS NAS IMAGENS RECONSTRUÍDAS

Em uma imagem reconstruída, a resolução é geralmente mais elevada nos locais onde o número de trajetórias por célula é maior, porquanto as amplitudes das células desses locais estão mais fortemente condicionadas (Lopes & Lopes, 1994a). Portanto, a resolução é influenciada

pelo tamanho das células envolvidas no processo de reconstrução da imagem. Células maiores tendem a ser atravessadas por mais raios; conseqüentemente, as amplitudes dessas células costumam ser mais fortemente condicionadas do que as amplitudes de células menores. O número de raios que atravessam a célula (i, j) é chamado *densidade de raios*, d_{ij} . O *mapa de densidades* é a imagem em que a amplitude de cada célula assume o valor respectivo de d_{ij} . Quando a geometria apresentada na Fig. 2.1 é empregada, a densidade de raios é maior próximo do centro do mapa de densidades. Portanto, os locais mais próximos das bordas das imagens reconstruídas são geralmente os mais afetados por artefatos. Tais locais constituem a região A' , apresentada na Fig. 3.4. A região central dessa figura é a região A , onde a resolução espacial é geralmente maior. Como a interseção das regiões A e A' é nula, a região de suporte (Gerwe & Plonus, 1998; Lopes & Lopes, 1993; Matson, 1998) da imagem reconstruída é a soma de A com A' .

Propõem-se a seguir duas técnicas para reduzir a quantidade de artefatos em imagens reconstruídas de meios geofísicos. A primeira dessas técnicas consiste em reconstruir imagens de uma parte do meio geofísico maior do que a parte de interesse, a fim de que tal parte seja reconstruída na região de maior densidade de raios. A parte do meio geofísico que não possua qualquer importância, ou possua importância secundária, deve ser reconstruída na região de menor densidade de raios, onde a resolução costuma ser menor. Essa técnica nem sempre pode ser empregada com facilidade, porque, em muitos casos, os experimentos geotomográficos utilizam os acessos ao meio geofísico que já estão disponíveis, como furos preexistentes ou galeria de minas. Conseqüentemente, as feições de interesse podem estar substancialmente fora da região das imagens reconstruídas onde a densidade de raios é elevada. Embora esse problema possa ser resolvido através de perfurações de novos acessos ao meio geofísico, os custos dessas perfurações podem não justificar a reconstrução mais exata da parte de interesse do meio

geofísico. Apresenta-se, portanto, uma outra técnica para reduzir a quantidade de artefatos nas imagens reconstruídas. Essa técnica está baseada no procedimento descrito por McKinnon & Bates (1981), para aumentar a resolução de imagens do coração. Esse procedimento é generalizado pela técnica de processamento descrita pelos seguintes passos (Lopes et al., 1998a).

- 1) Divide-se a região de suporte da imagem reconstruída em duas regiões, conforme mostrado esquematicamente na Fig. 3.4. A região A deve ser a de maior densidade de raios da imagem. Segundo o que foi mencionado anteriormente, essa região nem sempre contém as feições de maior interesse.
- 2) Remove-se a região A da imagem.
- 3) Calculam-se os valores dos raios-somas na imagem que contém apenas a região A'. Esse cálculo é feito empregando-se as localizações originais das antenas transmissora e receptora.
- 4) Subtraem-se esses valores calculados de raios-somas dos respectivos valores originais.
- 5) Reconstrói-se a região A da imagem, empregando-se os valores das diferenças de raios-somas, calculados no passo 4.
- 6) Calculam-se os valores dos raios-somas associados à região reconstruída no passo 5, empregando-se as localizações originais das antenas.
- 7) Subtraem-se esses valores calculados dos raios-somas dos respectivos valores originais.
- 8) Reconstrói-se a região A' da imagem, usando-se os valores das diferenças de raios-somas, calculados no passo 7.
- 9) Executam-se, iterativamente, os passos 3 a 8, até que as partes da imagem contidas nas regiões A e A' não sofram mudanças significativas com o passar das iterações.
- 10) Soma-se a parte da imagem contida na região A com a parte contida na região A', compondo-se assim a imagem.

Essa técnica é eficiente, porque, quando se reconstrói separadamente cada uma das partes que compõem a imagem, aumenta-se o efeito condicionador dos dados sobre as amplitudes das células dessas partes, ou seja, diminui-se *virtualmente* a relação entre o número de incógnitas e o número de equações dos sistemas resultantes da aplicação das equações (3.1) e (3.2) às trajetórias existentes.

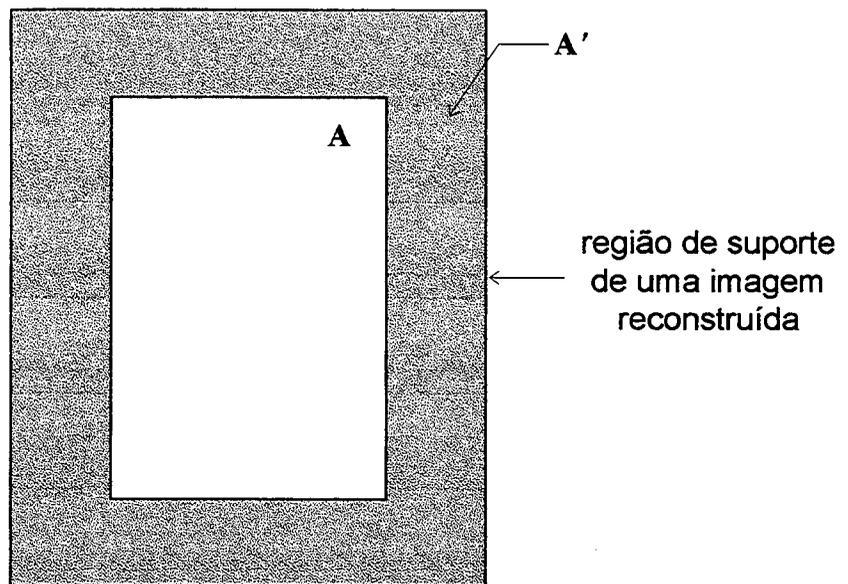


Figura 3.4 - Divisão da região de suporte de uma imagem reconstruída: a região mais interna, indicada pela letra *A*, e a região complementar de *A*, indicada por *A'*. As feições contidas na região *A* são geralmente menos degradadas por artefatos do que as contidas na região *A'*, porque a densidade de raios costuma ser maior na região *A*.

A Fig. 3.5 mostra como ocorre parte da propagação da informação durante o processo reconstrutor. O *condicionamento direto* das amplitudes das células é dado pelas informações associadas às trajetórias que atravessam essas células. Na Fig. 3.5, todas as amplitudes das células atravessadas pela trajetória 1 estão condicionadas à informação associada à trajetória 2.

Essa informação condiciona *diretamente* a amplitude da célula onde ocorre a interseção das trajetórias 1 e 2. Uma característica da inversão tomográfica é que as feições reconstruídas em uma região da imagem podem afetar as feições reconstruídas em outras regiões da imagem (Lopes et al., 1998a). Conseqüentemente, a reconstrução mais exata das feições contidas na região A ajuda a reconstruir melhor as feições contidas na região A', e vice-versa. Tal fato explica porque a técnica iterativa proposta reduz a quantidade de artefatos existentes nas imagens reconstruídas.

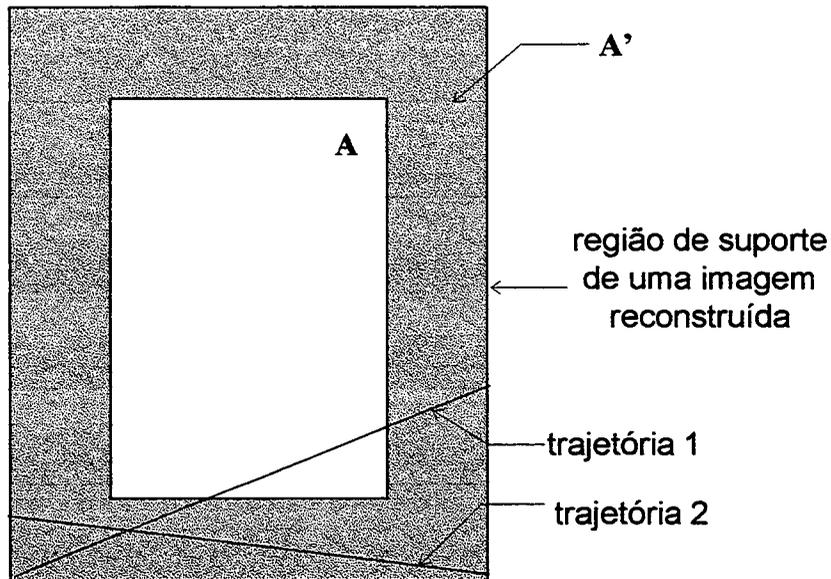


Figura 3.5 - *A propagação da informação no processo de reconstrução de imagens. A reconstrução mais exata das feições contidas na região A pode melhorar a reconstrução das feições contidas na região A', porque há trajetórias de raios que atravessam ambas as regiões, como é o caso da trajetória 1. Embora a trajetória 2 não cruze a região A, informações associadas a essa trajetória podem influenciar a reconstrução de feições contidas na região A, porque as trajetórias 1 e 2 se cruzam no interior da região de suporte da imagem.*

3.5. SÍNTESE DO MÉTODO DE RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS DESENVOLVIDO

Apresenta-se a seguir a síntese do processo proposto para a reconstrução de imagens de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa de meios heterogêneos.

- 1) Utiliza-se o algoritmo sintetizado pela equação (3.8), para resolver os sistemas de equações resultantes da aplicação das equações (3.1) e (3.2) às trajetórias selecionadas. Emprega-se, entre algumas iterações desse algoritmo, o processo de filtragem que envolve as equações (3.10)–(3.17), obtendo-se uma imagem em que as amplitudes das células são valores de $\Delta\beta$, e outra imagem em que as amplitudes das células são valores do fator de atenuação, na frequência f_1 .
- 2) Usa-se, nessas duas imagens, o algoritmo iterativo de segmentação, descrito na seção 3.4.
- 3) Empregando-se os valores de $\Delta\beta_{ij}$ e α_{ij} , bem como as frequências f_1 e f_2 , constroem-se os geotomogramas de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, por meio do algoritmo iterativo não linear que envolve as equações (2.9)–(2.11).

É importante mencionar que o algoritmo de segmentação de imagens apresentado pode ser descrito analiticamente através do emprego de funções-máscaras, o que facilita bastante a implementação computacional do algoritmo. Lopes et al. (1998a) propuseram um tipo de tomografia, que eles batizaram de *Tomografia de Segmentação*. Eles incorporaram funções-máscaras na versão aditiva generalizada do famoso algoritmo de Dines e Lytle, com a finalidade de ilustrar tanto o desempenho quanto as qualidades da tomografia de segmentação. Essa versão do algoritmo de Dines e Lytle foi proposta por Lopes et al. (1997a). As funções-máscaras

fornecem uma maneira eficiente de retirar do processo de reconstrução ora a região A , ora a região A' , que estão mostradas esquematicamente na Fig. 3.4.

3.6. ESTIMATIVA INICIAL HOMOGÊNEA

A versão aditiva do algoritmo tomográfico sintetizado pela equação (3.8) é o *algoritmo de Dines e Lytle*, se a variável de pesagem τ for igual a quatro (Dines & Lytle, 1979; Lopes et al., 1997a):

$$x_{ij}^{n+1} = x_{ij}^n + \frac{\sum_k \left[L_k^{-1} y_k - N_k^{-1} \sum_i \sum_j x_{ij}^n \operatorname{sgn}(l_{ijk}) \right] \operatorname{sgn}(l_{ijk}) N_k^{-4}}{\sum_k \operatorname{sgn}(l_{ijk}) N_k^{-4}} \quad (3.18)$$

Admitindo-se que a amplitude de cada célula da imagem usada para dar início ao processo reconstrutor seja igual a A , então se pode escrever

$$\mathbf{x}^0 = [A, A, \dots, A], \quad (3.19)$$

onde A é um número real. Substituindo-se a relação (3.19) nas equações (3.18) e (3.8), obtêm-se, respectivamente, os seguintes resultados, ao término da primeira iteração:

$$x_{ij}^1 = \frac{\sum_k L_k^{-1} y_k N_k^{-4} \operatorname{sgn}(l_{ijk})}{\sum_k \operatorname{sgn}(l_{ijk}) N_k^{-4}} \quad (3.20)$$

e

$$x_{ij}^1 = \frac{\sum_k \operatorname{sgn}(l_{ijk}) N_k^{-\tau}}{\sum_k L_k y_k^{-1} N_k^{-\tau} \operatorname{sgn}(l_{ijk})} \quad (3.21)$$

As equações (3.20) e (3.21) não envolvem a amplitude A de cada célula da estimativa inicial homogênea, dada pela relação (3.19). Isso significa que as imagens reconstruídas pelo algoritmo de Dines e Lytle e pelo algoritmo expresso pela equação (3.8) não dependem de estimativas iniciais homogêneas. Tais estimativas são facilmente geradas, e por isso são muito utilizadas para encetar algoritmos tomográficos iterativos (Vauhkonen et al., 1998). Imagens iniciais homogêneas, que se assemelhem à imagem reconstruída esperada, são comumente usadas em algoritmos tomográficos, com o objetivo de poupar iterações. Essa poupança não ocorre quando os algoritmos expressos pelas equações (3.8) e (3.18) são empregados (Lopes et al., 1997a). Os resultados notáveis, sintetizados pelas equações (3.20) e (3.21), são indubitavelmente importantes contribuições desta tese para a área de Processamento de Imagens, não só porque o algoritmo de Dines e Lytle tem sido muito utilizado, mas também porque eles sugerem que outros algoritmos tomográficos iterativos podem também apresentar desempenhos independentes de imagens iniciais homogêneas.

Apesar de o algoritmo de Dines e Lytle ser muito conhecido e estudado, não se encontrou na literatura especializada qualquer menção à sua independência em relação a imagens iniciais homogêneas. Tal comportamento não foi observado nem mesmo pelo matemático sueco Sven Ivansson (Ivansson, 1983), que dedicou um trabalho inteiramente ao estudo do algoritmo de Dines e Lytle. A *Técnica de Reconstrução Algébrica*, também conhecida como *Método de Kaczmarz* (Lopes & Lopes, 1991; Yu et al., 1992), é muito utilizada em experimentos tomográficos. Seu desempenho é dependente da imagem homogênea utilizada para encetá-lo, conforme indicam vários estudos efetuados pelo autor desta tese. A prova analítica dessa dependência está além dos objetivos deste trabalho. A influência de imagens iniciais *heterogêneas* sobre os desempenhos de algoritmos tomográficos tem sido bastante estudada recentemente (Zhu et al., 1998).

3.7. VERSÃO ADITIVA GENERALIZADA DO ALGORITMO DE DINES E LYTLE

Pode-se melhorar o desempenho do algoritmo de Dines e Lytle (Dines & Lytle, 1979), substituindo-se N_k^{-4} por $N_k^{-\tau}$, na equação (3.18) (Lopes et al., 1998a), onde τ é a variável de pesagem. O algoritmo resultante é independente de imagens homogêneas que sejam usadas para encotá-lo (Lopes et al., 1997a). Quando o nível de ruído é elevado, resultados satisfatórios costumam ser obtidos se τ for igual a dois; em caso contrário, deve-se usar τ igual a quatro. Semelhantemente ao que ocorre com o algoritmo sintetizado pela equação (3.8), o uso de valores não inteiros de τ costuma causar excessiva carga de computação. Lopes & Lopes (1992) e Lopes et al. (1997a) efetuaram simulações com o algoritmo de Dines e Lytle. Simulações envolvendo a versão aditiva generalizada do algoritmo de Dines e Lytle são apresentadas por Lopes et al. (1998a).

CAPÍTULO 4

A INFLUÊNCIA DA INTERFACE SOLO-AR SOBRE OS DADOS MEDIDOS

4.1. INTRODUÇÃO

O modelo descrito no Capítulo 3 admite que a única trajetória existente entre as antenas transmissora e receptora é a linha reta, conforme mostra a Fig. 3.1. Se as antenas estiverem perto da superfície do solo, então não é válida a segunda condição para a utilização da aproximação de raios retos, descrita na seção 2.3. Neste caso, o sinal recebido é influenciado pela *onda direta*, pela *onda refletida* na interface e pela onda refratada na interface, conhecida como *onda lateral*, conforme mostra a Fig. 4.1.

Antenas localizadas perto da superfície do solo podem transmitir ou captar ondas eletromagnéticas que são guiadas pela interface solo-ar. Essas ondas são chamadas de *ondas terrestres*, desde que as antenas estejam acima da interface. Quando a antena transmissora está soterrada, as ondas são conhecidas como *ondas laterais* (Barrick, 1998; Shavit & Rosen, 1995). Entretanto, emprega-se freqüentemente esta denominação qualquer que seja a localização da antena transmissora em relação à interface solo-ar (Li et al., 1998). Se as antenas transmissora e receptora estiverem em profundidades pequenas, então a onda refletida na interface cancela efetivamente a onda direta, e os sinais recebidos são influenciados principalmente pela onda lateral. Conforme a profundidade das antenas aumente, as ondas direta e refletida não mais se cancelam, e a influência delas sobre os sinais recebidos se torna importante. Se a profundidade

das antenas aumentar ainda mais, a contribuição da onda lateral para os sinais recebidos se torna desprezível. O objetivo principal deste capítulo é determinar o menor valor de profundidade a partir do qual se pode afirmar que os sinais recebidos não são significativamente afetados pelas ondas lateral e refletida. Esse valor de profundidade é de importância crucial para sondagens eletromagnéticas efetuadas a partir de furos. Apresentam-se três métodos de resolução do problema em questão: um método numérico, um método gráfico e um método analítico. Dois exemplos ilustram o emprego dos métodos.

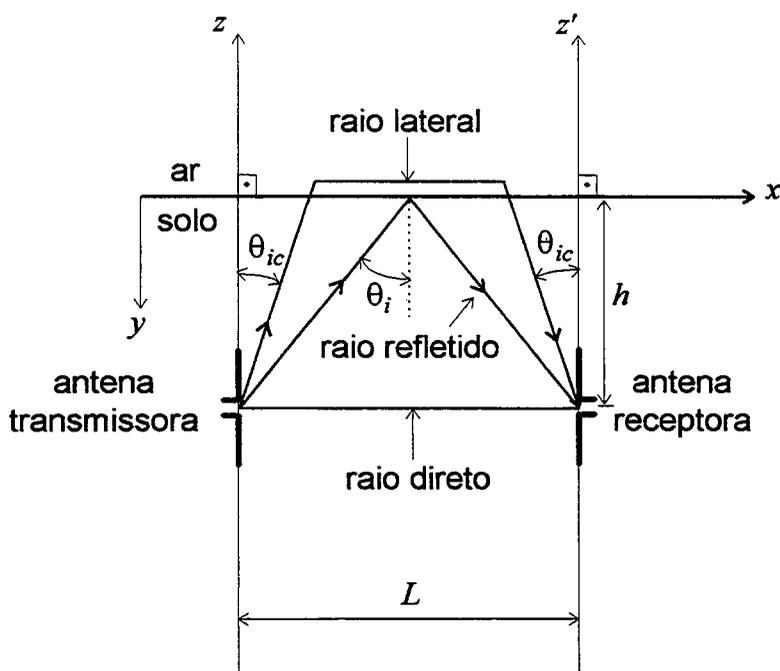


Figura 4.1 - Trajetórias das ondas eletromagnéticas entre as antenas transmissora e receptora, localizadas perto da interface solo-ar. Admite-se que os eixos z e z' dos dipolos elétricos curtos sejam perpendiculares à superfície do solo, indicada pelo eixo x . Considera-se que os centros de ambas as antenas estejam à distância h da superfície do solo, e que este seja homogêneo, linear e isotrópico. θ_{ic} é o ângulo crítico.

4.2. O MÉTODO

Para facilitar a análise da influência da interface solo-ar sobre os sinais medidos, admite-se que o solo seja homogêneo, linear, isotrópico, e que ambas as antenas sejam dipolos elétricos curtos, localizados à mesma profundidade. Na região de Fraunhofer, os sinais emitidos por qualquer tipo de antena tendem a apresentar características semelhantes às dos sinais emitidos por um dipolo elétrico curto. Tais considerações não são suficientemente restritivas, para inviabilizar a utilidade dos resultados da análise a ser apresentada, em vista da natureza aproximada do objetivo estabelecido, que é a *determinação da profundidade a partir da qual é desprezível a influência da interface solo-ar sobre os sinais captados*.

Em muitas sondagens geotomográficas, utiliza-se a geometria em que os furos apresentados na Fig. 2.1 são paralelos. Nesse caso, a intensidade do campo elétrico medido pela antena receptora, para a onda que percorreu o caminho direto, indicado na Fig. 4.1, é obtida fazendo-se $\theta = 90^\circ$ e $\varphi = 0^\circ$, na equação (2.5):

$$|E'_D| = \frac{Gf \exp(-\alpha L)}{L}, \quad (4.1)$$

Para a situação apresentada na Fig. 4.1, a intensidade do campo elétrico refletido, medido pela antena receptora, é aproximadamente

$$|E'_R| = \frac{|R(\theta_i)| Gf \exp\left(\frac{-\alpha L}{\text{sen}\theta_i}\right) \text{sen}^3\theta_i}{L}, \quad (4.2)$$

onde θ_i é o ângulo de incidência indicado na Fig. 4.1, e $R(\theta_i)$ é o coeficiente de reflexão para a onda plana que apresente o *modo transversal magnético*, também conhecido como *modo TM*. Assim, o campo magnético é perpendicular ao plano de incidência, que é o plano xy na Fig. 4.1,

e o campo elétrico é paralelo a esse plano. Se o meio for dielétrico, o módulo do coeficiente de reflexão é dado por (King & Sandler, 1994)

$$|R(\theta_i)| = \frac{\left| \sqrt{\epsilon_r - (\epsilon_r \sin \theta_i)^2} - \cos \theta_i \right|}{\left| \sqrt{\epsilon_r - (\epsilon_r \sin \theta_i)^2} + \cos \theta_i \right|}, \quad (4.3)$$

onde $\theta_i = \arctg\left(\frac{L}{2h}\right)$, h é a profundidade de ambas as antenas, conforme mostra a Fig. 4.1, e ϵ_r é a permissividade elétrica relativa *média* do solo. Dividindo-se a equação (4.2) pela equação (4.1), obtém-se

$$Q \triangleq \frac{|E'_R|}{|E'_D|} = |R(\theta_i)| \exp\left[\alpha L \left(1 - \frac{1}{\sin \theta_i}\right)\right] \sin^3 \theta_i. \quad (4.4)$$

O parâmetro Q quantifica a influência do sinal refletido sobre o sinal de interesse, que é o sinal associado à onda que percorreu o caminho direto. A equação (4.4) é uma ferramenta importante para o projeto de experimentos geotomográficos eletromagnéticos que utilizam furos. Ela permite determinar a profundidade a partir da qual a influência adversa do sinal refletido sobre o sinal de interesse é desprezível. Se $\hat{Q} \triangleq \frac{Q}{|R(\theta_i)|}$, então, a partir da equação (4.4), pode-se escrever

$$\hat{Q} = \exp\left[\alpha L \left(1 - \frac{1}{\sin \theta_i}\right)\right] \sin^3 \theta_i. \quad (4.5)$$

A equação (4.5) possui algumas propriedades que facilitam o projeto do experimento geotomográfico eletromagnético: ela não depende do coeficiente de reflexão, presta-se mais facilmente à investigação analítica do que a equação (4.4) e, geralmente, permite o estabelecimento de uma margem de segurança no projeto, porque o módulo do coeficiente de

reflexão só pode assumir valores no intervalo $[0, 1]$. Se o objetivo do projeto é a determinação da profundidade h , a partir da qual $\frac{|E'_R|}{|E'_D|} \leq \Psi$, onde $0 \leq \Psi \leq 1$, então tal objetivo pode ser alcançado, fazendo-se $\hat{Q} = \Psi$, na equação (4.5), e resolvendo-se essa equação para $\text{sen} \theta_i$. Tal valor de $\text{sen} \theta_i$ satisfaz, necessariamente, a condição $Q \leq \Psi$, porque $Q \leq \hat{Q}$. Se o valor do coeficiente de reflexão, associado ao ângulo θ_i que satisfaz a equação (4.5), for diferente da unidade, então a profundidade h encontrada é maior do que aquela para a qual $Q = \Psi$. Esse acréscimo no valor da profundidade é a margem de segurança, que garante que a condição $Q \leq \Psi$ não seja violada. Considerações trigonométricas na Fig. 4.1 permitem estabelecer que o relacionamento entre $\text{sen} \theta_i$ e a profundidade h é dado por

$$h = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{\text{sen}^2 \theta_i} - 1 \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

A Fig. 4.2 expressa graficamente a equação (4.5). Apresentam-se curvas de \hat{Q} em função do produto αL , para diversos valores do seno do ângulo de incidência. O produto αL pode ser interpretado como a quantidade de profundidades de penetração que a onda direta percorre, quando ambas as antenas estão separadas pela distância L . A escala horizontal do nomograma apresentado na Fig. 4.2 é linear. A escala vertical é logarítmica, o que permite a expressão das curvas de \hat{Q} em função de αL através de linhas retas. Teoricamente, pode-se determinar certa profundidade das antenas transmissora e receptora em que nenhum sinal refletido na interface solo-ar excita a antena receptora. Em um meio dielétrico, tal profundidade é encontrada, anulando-se o módulo do coeficiente de reflexão, expresso pela equação (4.3). O *ângulo de incidência* para o qual a onda é *completamente transmitida* para o ar é chamado *ângulo de Brewster* θ_B (Born & Wolf, 1993). Ele é dado por $\theta_B = \text{arctg} \varepsilon_r^{-1/2}$. A

profundidade em que $|R(\theta_i)|$ é nulo pode ser determinada, usando-se θ_B na equação (4.6). O resultado é o seguinte

$$h_B = \frac{L\epsilon_r^{1/2}}{2} \tag{4.7}$$

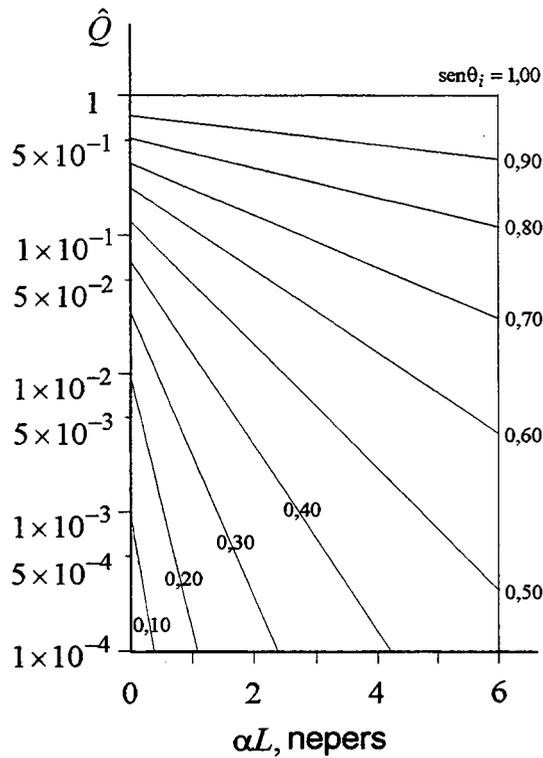


Figura 4.2 - Expressão gráfica do relacionamento entre os fatores que estabelecem a influência máxima do sinal refletido sobre o sinal que percorre o caminho direto. As retas tocam o eixo vertical em $\text{sen}^3 \theta_i$. Portanto, $\text{sen} \theta_i \geq \sqrt[3]{\hat{Q}}$. O produto αL é a quantidade de profundidades de penetração que a onda eletromagnética percorre ao longo do caminho direto indicado na Fig. 4.1.

O módulo do coeficiente de reflexão pode não ser nulo tanto para profundidades maiores do que h_B como para profundidades menores. Conseqüentemente, o conhecimento da profundidade h_B é de pouca utilidade prática em experimentos geotomográficos eletromagnéticos, porque as antenas precisam variar as suas profundidades. A variação não monótona do módulo do coeficiente de reflexão com a profundidade das antenas é uma das causas que torna preferível projetar um experimento geotomográfico eletromagnético utilizando a equação (4.5) em vez da equação (4.4).

O módulo do coeficiente de reflexão é unitário, se os termos sob os radicais, na equação (4.3), forem menores ou iguais a zero: $\varepsilon_r - (\varepsilon_r \sin\theta_i)^2 \leq 0$. Simplificando-se essa expressão, obtém-se $\sin\theta_i \geq \varepsilon_r^{-1/2}$. O *ângulo crítico* θ_{ic} é o ângulo de incidência para o qual (Gerken, 1989)

$$\sin\theta_{ic} = \varepsilon_r^{-1/2}. \quad (4.8)$$

Quando o ângulo de incidência da interface solo-ar é o ângulo crítico, origina-se o raio lateral indicado na Fig. 4.1. A onda lateral é guiada ao longo da interface, irradiando energia continuamente para o solo (King & Sandler, 1994). Essa irradiação causa a redução da intensidade da onda lateral, no sentido positivo do eixo x , A Fig. 4.3 mostra que a onda lateral é uma onda plana, que se propaga na direção e sentido do vetor $\mathbf{u} = (\sin\theta_{ic})\hat{\mathbf{x}} + (\cos\theta_{ic})\hat{\mathbf{y}}$, onde $\hat{\mathbf{x}}$ e $\hat{\mathbf{y}}$ são vetores unitários. As linhas tracejadas representam planos onde a fase é constante. Os planos de fase constante são ortogonais à direção de propagação da onda, dada pelo vetor \mathbf{u} . Como as intensidades dos campos elétrico e magnético não são constantes, em cada plano de fase, a onda plana representada na Fig. 4.3 não é uniforme. Embora, na superfície do solo, o componente do vetor de Poynting na direção normal à interface não seja geralmente nulo, a média temporal desse componente é nula. Isso significa que a energia eletromagnética cruza a

interface repetidamente, do solo para o ar, e vice-versa; mas não há um fluxo de potência permanente do solo para o ar (Born & Wolf, 1993).

Obtém-se a profundidade em que o ângulo de incidência é o ângulo crítico, combinando-se as equações (4.6) e (4.8). O resultado é o seguinte:

$$h_c = \frac{L\sqrt{\epsilon_r - 1}}{2}. \quad (4.9)$$

O módulo do coeficiente de reflexão, dado pela equação (4.3), é unitário, se a profundidade das antenas transmissora e receptora não for maior do que h_c . Nessa faixa de profundidades, o módulo do coeficiente de reflexão não se anula, porque h_B , dado pela equação (4.7), é maior do que h_c . Entretanto, h_c aproxima-se de h_B , em solos onde a permissividade elétrica é elevada, como é o caso de solos úmidos.

Explicitando-se o $\text{sen } \theta_i$, na equação (4.6), obtém-se

$$\text{sen } \theta_i = \frac{L}{\sqrt{L^2 + 4h^2}}.$$

Essa expressão permite concluir que $\text{sen } \theta_i \cong 1$, quando a profundidade h é muito menor do que $L/2$. A Fig. 4.3 mostra que $\hat{Q} \cong 1$, para $\text{sen } \theta_i = 1$ e para qualquer valor do produto αL . Como essa pequena profundidade h é menor do que a profundidade h_c , expressa pela equação (4.9), conclui-se que o módulo do coeficiente de reflexão, dado pela equação (4.3), é unitário, quando a profundidade das antenas é pequena. Como $Q = \hat{Q} |R(\theta_i)|$, então $Q \cong 1$, para valores pequenos de h . Conseqüentemente, nesta situação, a equação (4.4) permite que se conclua que $|E'_R| \cong |E'_D|$. Para a incidência rasante, isto é, para $\theta_i = 90^\circ$, o campo elétrico refletido, medido pela antena receptora, está em oposição de fase ao campo elétrico associado à onda que atravessa o meio geofísico através do caminho direto. Portanto, tais campos se

cancelam efetivamente, quando a profundidade das antenas é pequena. O campo elétrico resultante é praticamente causado pela onda lateral. Com o aumento da profundidade das antenas, os campos direto e refletido não mais se cancelam, e a contribuição deles para o campo elétrico medido tende a tornar-se dominante.

A Tabela 4.1 apresenta parâmetros eletromagnéticos típicos de alguns materiais, na faixa de frequências de muitas aplicações da geotomografia eletromagnética (Alumbaugh & Morrison, 1995; Alumbaugh & Newman, 1997; Jesch & McLaughlin, 1984; Lopes & Lopes, 1994a; Olsson et al., 1992; Ramirez, 1986; Sandberg et al., 1991; Zeng & McMechan, 1997). A condutividade elétrica, a permissividade elétrica e o fator de atenuação são muito influenciados pela presença da água. Os valores desses parâmetros geralmente crescem com o aumento da quantidade de água presente nos materiais. Na Tabela 4.1, esse fato é evidenciado pela variação existente entre os parâmetros eletromagnéticos típicos de areias seca e saturada, calcários seco e úmido, solos arenosos seco e úmido, e solos seco e úmido. O material da tabela que possui o maior valor de condutividade elétrica e o maior valor de fator de atenuação é o carvão gaseificado. A água é o material cujo valor de permissividade elétrica é o mais elevado. Os menores valores de condutividade elétrica estão associados ao ar, areia seca, granito não fraturado, neve seca e sal-gema. Os materiais cujos valores de permissividade elétrica são os mais baixos da Tabela 4.1 são: ar, areia seca, gelo puro, petróleo e solo arenoso seco. Os menores valores de fator de atenuação estão associados ao ar, areia seca, gelo puro, granito não fraturado, neve seca e sal-gema.

Basicamente, o método descrito neste capítulo compara, na recepção, a intensidade do campo elétrico associado à onda que se refletiu na interface solo-ar com a intensidade do campo elétrico relativo à onda que não sofreu reflexões ou refrações significativas, ao longo do trajeto entre a antena transmissora e a antena receptora. A comparação não envolve explicitamente a

onda refratada na interface solo-ar porque tal onda costuma ser bem mais fraca do que a onda refletida. O diagrama de radiação de um dipolo elétrico curto indica que essa antena emite campos mais intensos na direção perpendicular ao seu eixo. As intensidades dos campos diminuem conforme a direção de emissão se aproxime da do eixo do dipolo. A Fig. 4.1 mostra que a trajetória da onda refratada é a que mais se aproxima da direção do eixo da antena transmissora (eixo z). Essa é uma das principais razões por que a influência sobre os sinais recebidos da onda que se refratou na interface solo-ar costuma ser mais fraca do que a influência da onda que se refletiu lá. Como as características direcionais da antena receptora foram consideradas semelhantes às da antena transmissora, aquela antena atenua mais os sinais associados às ondas que a atinjam por direções próximas da de seu eixo.

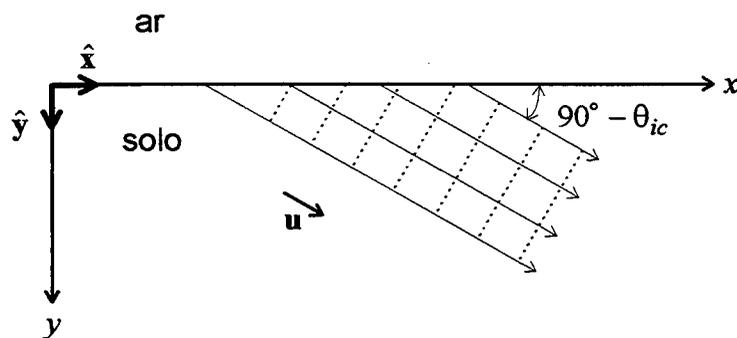


Figura 4.3 - A onda lateral. As linhas tracejadas representam os planos onde a fase é constante.

O vetor u é normal a esses planos. Ele indica a direção e o sentido do fluxo de potência. Admite-se que o solo seja um dielétrico não dissipativo. Embora não haja transferência efetiva de energia do solo para o ar, existe campo eletromagnético no ar, para que se satisfaçam as condições de continuidade na interface solo-ar. O campo no ar é atenuado com o aumento da distância até a superfície do solo.

Tabela 4.1 - Valores típicos de condutividade elétrica, permissividade elétrica relativa e fator de atenuação, para vários materiais de interesse em aplicações da geotomografia eletromagnética. As frequências envolvidas situam-se entre 1 MHz e 50 MHz.

MATERIAL	σ (S/m)	ϵ_r	α (Np/m)
Água potável	10^{-3}	81	0,02
Ar	0	1	0
Areia seca	$10^{-7} - 10^{-3}$	3 - 6	$10^{-5} - 10^{-1}$
Areia saturada	$10^{-4} - 10^{-2}$	20 - 30	$3 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-1}$
Arenito úmido	0,04	6	1
Barita seca	—	14	—
Barro	4×10^{-3}	5,0 - 6,5	0,25
Basalto úmido	0,01	8	0,5
Calcário seco	10^{-9}	7	≈ 0
Calcário úmido	0,03	4 - 8	0,8 - 0,9
Calcita	—	9,7	—
Carvão gaseificado	0,1	7	1,7
Carvão virgem	10^{-3}	5	0,08
Concreto	$1,6 \times 10^{-4} - 3,2 \times 10^{-4}$	3,6	0,02 - 0,03
Dolomita	10^{-4}	6,8	7×10^{-3}
Gabro	—	9	—
Gelo puro	10^{-6}	3	10^{-4}
Gnaisse seco	—	5,8	—
Granito não fraturado	10^{-8}	5	8×10^{-7}
Granito	10^{-3}	7	0,07
Lignita	4×10^{-3}	27	0,14
Morena	$3 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}$	7,4	0,2 - 0,3
Neve seca	$10^{-6} - 10^{-5}$	1	$10^{-4} - 10^{-3}$
Pedra-sabão (esteatita) seca	—	5 - 7	—
Petróleo	$10^{-3} - 10^{-2}$	2 - 4	0,1 - 0,7
Quartzo fundido	—	3,8	—
Sal-gema	10^{-6}	5,8	8×10^{-5}
Solo arenoso seco	$1,5 \times 10^{-4}$	3	0,02
Solo arenoso úmido	7×10^{-3}	26	0,3
Solo seco	10^{-3}	5	0,08
Solo úmido	0,01 - 0,05	15 - 25	0,3 - 1,0
Tufo	0,07	8 - 10	1,4

4.3. EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS DESENVOLVIDOS

Exemplo 4.1. Admite-se que o meio geofísico seja solo arenoso seco, e que a separação entre os acessos ao meio geofísico, onde são colocadas as antenas, seja igual a sessenta metros. Deseja-se determinar a profundidade a partir da qual se pode afirmar que a intensidade do campo elétrico refletido na interface solo-ar é menor do que 10% da intensidade do campo elétrico associado à onda eletromagnética que percorreu o caminho direto. Inicia-se a resolução desse problema, consultando-se a Tabela 4.1. Conclui-se que $\alpha = 0,02 \text{ Np/m}$, para solo arenoso seco. Como a largura da região investigada é sessenta metros, então $L = 60 \text{ m}$, e $\alpha L = 1,2$. A largura da região é *maior* do que uma profundidade de penetração. Marca-se, no nomograma, o ponto $(\alpha L ; \hat{Q}) = (1,2 ; 0,1)$. Conclui-se que o $\text{sen } \theta_i$ é aproximadamente igual a 0,61. Empregando-se a equação (4.6), conclui-se que $h \cong 39$ metros. Resolvendo-se numericamente a equação (4.5), obtém-se $\text{sen } \theta_i = 0,6036$. A profundidade correspondente a esse valor do seno do ângulo de incidência é 39,6 metros. A resolução do problema através do emprego da Fig. 4.2 conduz a resultados aproximados, porém eles são satisfatórios. Há muitas causas de incertezas no procedimento descrito, que podem influenciar o valor da profundidade das antenas. Uma dessas causas é o fato de o valor do fator de atenuação empregado no projeto poder ser significativamente diferente daquele encontrado no meio investigado. Pode-se tentar resolver o problema das incertezas associadas ao projeto, analisando-se as condições que propiciam a superestimação da profundidade das antenas, pois, *na maioria das circunstâncias*, a influência da onda refletida sobre os dados medidos decresce com o aumento de h . A redução dos valores de α e de \hat{Q} favorece o aumento de h . Admitindo-se que a permissividade elétrica relativa de solo arenoso seco seja 3, conforme estabelece a Tabela 4.1, pode-se calcular o módulo do

coeficiente de reflexão, dado pela equação (4.3): $|R(37,1^\circ)| = 1$. O ângulo crítico é dado pela equação (4.8): $\theta_{ic} = 35,3^\circ$. A profundidade associada ao ângulo crítico é encontrada com o auxílio da equação (4.9): $h_c = 42,4$ metros. Empregando-se a equação (4.7), conclui-se que $h_B = 52,0$ metros. Na profundidade de 39,6 metros, o valor da razão $|E'_R|/|E'_D|$ é $Q = |R(37,1^\circ)|\hat{Q} = 0,1$. É importante notar que, na profundidade $h_B = 52,0$ metros, não há, teoricamente, a influência do campo elétrico refletido sobre os dados medidos. Portanto, $Q = 0$, para $h_B = 52,0$ metros. No entanto, essa influência existe tanto em *profundidades menores* como em *profundidades maiores* do que cinquenta e dois metros. Entre $h_c = 42,4$ metros e $h_B = 52,0$ metros, o campo elétrico refletido sofre uma variação relativamente acentuada em sua intensidade, pois a magnitude do coeficiente de reflexão muda de seu valor máximo para o seu valor mínimo. O intervalo $[h_c, h_B]$, em que o fenômeno acontece, estreita-se conforme aumenta a permissividade elétrica do meio investigado.

Existem situações em que a Tabela 4.1 não pode ser empregada. Uma delas ocorre quando as frequências de operação não estão entre 1 MHz e 50 MHz. Outra situação sucede quando o material investigado não consta na tabela. Sugerem-se os seguintes procedimentos, para qualquer situação que impeça a utilização da Tabela 4.1.

- a) Consultar outras fontes existentes na literatura especializada (Knight & Nur, 1987; Wensink, 1993).
- b) Colher testemunhos do meio investigado, a fim de *medir* os parâmetros de interesse.
- c) Reunir evidências geofísicas, que permitam *estimar* as faixas de variação dos parâmetros de interesse. Nesta situação, podem ser úteis outros métodos de prospecção geofísica, inclusive aqueles que não são eletromagnéticos (Gerkens, 1989;

Ramirez et al., 1993), bem como modelos para o comportamento elétrico dos materiais (Lysne, 1983).

- d) Admitir que o meio investigado seja homogêneo, e determinar os seus parâmetros eletromagnéticos médios. Neste caso, as profundidades das antenas devem ser bastante aumentadas, para garantir que não haja influências significativas da interface solo-ar sobre os dados medidos.

Exemplo 4.2. Turner & Siggins (1994) realizaram experimentos geotomográficos com o radar, utilizando antenas localizadas em dois furos paralelos, existentes em uma formação granítica. A distância entre os furos era igual a oito metro e meio. A análise espectral dos pulsos recebidos indicou que o sinal que sofreu reflexão na interface solo-ar devia apresentar amplitude aproximadamente igual a um décimo da amplitude do sinal que percorreu o caminho direto, quando a antena transmissora se encontrasse à profundidade de 4,8 metros e a antena receptora ficasse à profundidade de 6,1 metros. Emprega-se a seguir o método apresentado neste capítulo, para determinar aproximadamente a profundidade a partir da qual se pode dizer, com relativa segurança, que a amplitude do sinal refletido na interface solo-ar é menor ou igual a 10% da amplitude do sinal que percorreu o caminho direto entre as antenas transmissora e receptora. Consultando-se a Tabela 4.1, conclui-se que $\alpha = 0,07 \text{ Np/m}$, para o granito. Portanto, $\alpha L = 0,6$ profundidades de penetração. Embora o valor do seno do ângulo de incidência possa ser encontrado através do nomograma apresentado na Fig. 4.2, resolve-se esse problema por outro método, que é mais simples, bem como mais preciso. Para $\hat{Q} = 0,1$ e $0,5 \leq \alpha L \leq 9,8$, várias simulações computacionais indicaram que a seguinte aproximação conduz a resultados satisfatórios:

$$\text{sen } \theta_i = 0,5928 (\alpha L)^{0,1589} + e, \quad (4.10)$$

onde e representa o erro associado a essa aproximação. As simulações permitiram concluir que $|e| \leq 0,007$. Desprezando-se esse erro, e substituindo-se a equação (4.10) na equação (4.6), obtém-se

$$\hat{h} = L \left[0,7114 (\alpha L)^{-0,3178} - 0,25 \right]^{1/2}, \quad (4.11)$$

onde \hat{h} é a profundidade associada a $\hat{Q} = 0,1$. Cabe ressaltar que a equação (4.11) é válida para $0,5 \leq \alpha L \leq 9,8$. Essa faixa de quantidades de profundidade de penetração é mais ampla do que a exposta na abcissa do nomograma apresentado na Fig. 4.2. Além dessa qualidade, a equação (4.11) permite maior facilidade no cálculo da profundidade a partir da qual $Q \leq 0,1$, em comparação com o uso do nomograma ou com a inversão numérica da equação (4.5), seguidos do emprego da equação (4.6). Para $\alpha L = 0,6$ e $L = 8,5\text{ m}$, a equação (4.11) fornece $\hat{h} = 6,5\text{ m}$. Tal valor é idêntico ao que se obtém através da inversão numérica mencionada. Ele é próximo do valor de profundidade da antena receptora relatado por Turner e Siggins, que é 6,1 metros. As razões apresentadas a seguir contribuíram para a discrepância entre esse valor de profundidade e o valor calculado neste capítulo.

- a) As antenas transmissora e receptora não ficaram à mesma profundidade no experimento realizado por Turner e Siggins.
- b) Naquele experimento, a superfície do solo era inclinada. Portanto, os furos não eram perpendiculares à interface solo-ar.

É interessante notar que o método proposto superestimou o valor da profundidade em questão. A superestimação, que advém de simplificações do problema, estabelece uma margem de segurança no valor da profundidade calculada.

4.4. CONCLUSÕES

Embora a maioria das aplicações da geotomografia eletromagnética envolva frequências entre 1 MHz e 50 MHz, existem casos em que as frequências não se encontram nessa faixa. Laine et al. (1980) descrevem um experimento geotomográfico que visou à monitorização do processo de injeção de argamassa fluida no subsolo. Essa monitorização é importante no campo da Engenharia Civil. A frequência de operação foi 100 MHz. Obviamente, a Tabela 4.1 não pode ser empregada nesse caso. A influência da interface solo-ar sobre os sinais captados pode ser avaliada satisfatoriamente pelo método descrito na seção 4.2, apesar de ele modelar, de forma aproximada, as interações complexas existentes entre as ondas eletromagnéticas e o meio geofísico. A capacidade de o método superestimar as condições adversas não só simplifica o problema, como também favorece a obtenção de resultados com margem de segurança expressiva.

As equações (4.3), (4.7)–(4.9) só se aplicam a meios dielétricos. Aplicam-se a esses meios ou aos meios dissipativos os três métodos apresentados neste capítulo, para o cálculo da profundidade a partir da qual se pode afirmar que é desprezível a influência da interface solo-ar sobre os sinais associados à onda que percorre o caminho direto entre as antenas transmissora e receptora. As influências de outras interfaces sobre esses sinais podem ser avaliadas mediante adaptações simples desses três métodos.

CAPÍTULO 5

COMPARAÇÃO ENTRE A GEOTOMOGRAFIA ELETROMAGNÉTICA E O RADAR DE SUBSUPERFÍCIE

5.1. INTRODUÇÃO

Os objetivos deste capítulo são os seguintes:

- 1) mostrar que, em muitas situações, a interpretação dos geotomogramas é facilitada pelas informações fornecidas pelo radar de subsuperfície;
- 2) esclarecer algumas limitações da geotomografia eletromagnética, através do estudo de casos em que o radar de subsuperfície pode ser facilmente utilizado, embora a utilização da geotomografia eletromagnética seja pouco recomendada, ou mesmo não recomendada;
- 3) fornecer conteúdos que esclareçam se é adequado empregar a geotomografia eletromagnética, o radar de subsuperfície ou ambas as técnicas, para sondar determinada região.

O radar de subsuperfície é um método dinâmico de sondagem eletromagnética, que permite tanto o reconhecimento como a caracterização detalhada não invasiva de uma região (Lopes, 1998). Esse radar é empregado em sondagens espaciais, aéreas, terrestres e em sondagens realizadas a partir de furos (Hara et al., 1994; Lopes et al., 1997c; Lopes et al., 1997d; Prensky, 1994; Skolnik et al., 1992). Nos métodos dinâmicos, sinais são injetados no solo e, após atravessarem uma parte do meio geofísico, as amplitudes ou os tempos de propagação são

medidos em pontos adequadamente escolhidos. É importante ressaltar que, nos métodos dinâmicos, a dimensão temporal sempre está presente nas equações de campo. Em muitos casos, essa presença ocorre indiretamente, através da frequência ou da diferença de fase. A geotomografia eletromagnética *geralmente* necessita de acessos ao meio investigado, como furos ou galerias de minas, conforme mostram as Figs. 1.1 e 2.1. Por outro lado, o radar de subsuperfície pode dispensar tais acessos, dependendo da aplicação, conforme evidencia a Fig. 5.1 (Oswald, 1988).



Figura 5.1 - Um sistema de radar montado em um helicóptero, para realizar sondagens geofísicas. As antenas transmissora e receptora são visíveis à direita e à esquerda do helicóptero.

5.2. ESTUDO DE CASOS

O radar de subsuperfície é capaz de sondar um meio, a partir de aviões ou mesmo de satélites (Hara et al., 1994; Tang et al., 1977). Durante a missão Apolo 17 da NASA (“National

Aeronautics and Space Administration”), o subsolo da Lua foi sondado por um radar, que a orbitava à altitude de aproximadamente cento e dez quilômetros (Porcello et al., 1974). A geotomografia eletromagnética não é adequada a esse tipo de sondagem, *porque ela necessita que a região de interesse seja investigada a partir de várias direções distintas*. A geotomografia eletromagnética geralmente é usada em aplicações localizadas, que requeiram resolução espacial elevada. A resolução espacial fornecida pela geotomografia eletromagnética é quase sempre muito superior à fornecida pelo radar de subsuperfície. Sondagens aéreas e espaciais não costumam ser adequadas às aplicações localizadas, porque esses tipos de sondagem geralmente não fornecem resolução espacial suficientemente elevada. Na literatura consultada, não há menção ao uso da geotomografia eletromagnética em sondagens aéreas e espaciais.

Há situações em que tanto a geotomografia eletromagnética como o radar de subsuperfície podem ser empregados, o que facilita a interpretação dos resultados. Esses métodos de sondagem foram usados por Sandberg et al. (1991), na investigação de uma mina localizada na Suécia. Os autores concluíram que a geotomografia eletromagnética fornecia informação detalhada sobre as propriedades do meio sondado, *tanto do ponto de vista qualitativo quanto do quantitativo*. As informações obtidas pelo radar de subsuperfície eram menos esclarecedoras do que as obtidas pela geotomografia eletromagnética. As orientações e as extensões de zonas fraturadas em rochas cristalinas foram muito bem caracterizadas, graças à combinação das informações colhidas pelo radar de subsuperfície em vários furos. Ele é recomendado nas situações em que apenas um acesso à região de interesse é disponível, ou quando não há qualquer acesso à região (Lopes et al., 1997c; Lopes et al., 1997d).

O radar de subsuperfície é adequado à *deteção* e à *localização aproximada* de estruturas soterradas (Chan et al., 1997). Ele pode também ser empregado para sondar paredes, a fim de localizar canos, espaços vazios e compartimentos. Em situações como essas, em que as estruturas de interesse não se encontram abaixo do nível do solo, não é comum dizer-se que o

georadar pode ser empregado, mas que o *radar de subsuperfície* pode ser empregado. Essa mudança de terminologia geralmente ocorre em situações em que a *terra* não esteja envolvida.

Peters et al. (1994) afirmaram que o radar de subsuperfície possibilitou a sondagem não destrutiva de um compartimento desconhecido em uma pirâmide localizada em Tenerife, nas Ilhas Canárias. É evidente que a geotomografia eletromagnética e o radar de subsuperfície são técnicas distintas de sondagem eletromagnética. Essas técnicas podem, entretanto, ser combinadas para facilitar a interpretação dos resultados. Um exemplo de combinação foi fornecido por Witten et al. (1994). Eles empregaram métodos analíticos para gerar imagens simples de objetos localizados isoladamente no solo. Os sinais foram captados apenas na superfície do solo; por isso, as imagens geradas não apresentaram resolução espacial tão elevada quanto a comumente observada em imagens reconstruídas através da geotomografia de transmissão. Os algoritmos analíticos usados por Witten et al. foram semelhantes aos da tomografia de difração (Deming & Devaney, 1997; Ladas & Devaney, 1992; Pan 1998). Observou-se que objetos maiores do que um comprimento de onda, localizados na região de campo distante das antenas, não eram reconstruídos bem. Ademais, objetos separados por menos do que um comprimento de onda não eram reconstruídos individualmente, ou seja, eles eram reconstruídos como se fossem um. Enquanto a geotomografia eletromagnética de transmissão fornece a distribuição espacial de permissividades elétricas e, em muitos casos, a de condutividades elétricas (Lopes & Lopes, 1989), o algoritmo de Witten et al. apenas fornece a localização e a extensão dos objetos soterrados. Tal algoritmo negligencia os efeitos de condução elétrica, o que causa o aumento das incertezas relacionadas às sondagens de objetos localizados eletricamente longe das antenas. As frequências empregadas variaram entre 40 MHz e 110 MHz. O objetivo da expedição geofísica era sondar canos e urnas funerárias localizados em profundidades inferiores a 2,52 metros.

Existem situações em que o radar geofísico pode ser empregado com bastante facilidade, embora o mesmo nem sempre possa ser afirmado em relação à geotomografia eletromagnética. Tarantolo & Unterberger (1978) afirmaram que o radar geofísico é capaz de detectar furos que não foram interceptados por galerias de minas. Furos representam um perigo potencial aos trabalhos em minas de sal. A única mina de sal conhecida na Inglaterra, na década de 60, foi quase perdida, quando as escavações interceptaram um furo desconhecido, ocasionando a invasão repentina da mina por salmoura. O emprego do radar geofísico podia ter evitado esse acidente. O georadar dispensa perfurações em áreas desconhecidas, porque ele pode investigar tais áreas de forma não invasiva (Dogaru & Carin, 1998; Sato et al., 1997). Se as evidências fornecidas pelo radar geofísico e, possivelmente, por outros métodos de sensoriamento remoto indicarem que as áreas desconhecidas não são perigosas, então as escavações podem atingir essas áreas. Em mineração de sal, deve-se evitar o emprego de métodos de sondagem geofísica que necessitem da realização de perfurações em áreas pouco conhecidas ou totalmente desconhecidas. Esse fato pode inviabilizar o emprego da geotomografia eletromagnética.

Aplicações que exijam rapidez nas sondagens podem tornar o georadar mais atrativo do que a geotomografia eletromagnética. Esse é o caso da localização de minas explosivas. Peters et al. (1994) declararam que os primeiros empregos do georadar ocorreram durante a Guerra do Vietnã, que aconteceu entre 1954 e 1975. Desenvolveram-se sistemas de radar para localizar minas não metálicas soterradas e túneis. Essa aplicação apresenta dificuldades significativas, devido às perdas elétricas no solo, à possibilidade de haver contrastes baixos entre os parâmetros elétricos dos alvos e os do solo, e à ampla variedade de ecos indesejáveis (“clutter”), causados pela interface solo-ar, rochas, raízes de árvores, entre outras estruturas. Embora seja fácil desenvolver sistemas capazes de detectar minas não metálicas soterradas, o reconhecimento dos ecos dessas minas, em meio aos sinais indesejáveis, é bastante difícil, porque as características desses sinais indesejáveis variam muito (Baum, 1997). Essa variação é

causada pela diversidade de características que o solo pode apresentar. Ainda hoje não existe um sistema de radar geofísico que realize eficientemente a detecção de minas não metálicas, porque é difícil satisfazer o requerimento de elevada exatidão de detecção, justificado pelo perigo, simultaneamente com o requerimento de baixa taxa de alarme falso, justificado pela rapidez com que áreas vastas precisam ser sondadas. Embora a geotomografia eletromagnética geralmente forneça resultados com resolução espacial muito superior à fornecida pelo georadar, a geotomografia eletromagnética não costuma ser capaz de sondar áreas extensas com a rapidez do georadar.

Outra situação em que a rapidez das sondagens, entre outros fatores, inviabiliza o emprego da geotomografia eletromagnética é a localização de canos (Xu & McMechan, 1997). A necessidade de localizar canos, no chão ou em paredes, aumentou muito, devido ao uso de tubos não metálicos para a distribuição de gás e de água. Detectores de metal são insensíveis a esses canos. Para remediar esse problema, fios de metal têm sido dispostos paralelamente aos canos. Entretanto, há muitos casos em que isso não foi feito, ou o fio foi removido, ou se deteriorou. Tentativas de incorporar metais nas paredes dos canos plásticos não foram totalmente aceitas, porque os metais reduzem a resistência e a durabilidade dos canos. Um sistema portátil de radar geofísico, chamado *Terrascan*, foi desenvolvido na década de 70 (Peters et al., 1994). Ele tem sido usado, com bastante sucesso, para localizar canos metálicos ou não. Dipolos resistivamente carregados, dispostos ortogonalmente, como mostra a Fig. 5.2, foram posteriormente incorporados ao sistema *Terrascan*, o que possibilitou excelente isolamento entre os sinais emitidos e os recebidos. A importância desse isolamento é evidenciada quando o alvo é exíguo, o que proporciona pouco eco, ou a distância entre o radar e o alvo é pequena. O georadar com dipolos ortogonais é pouco sensível a camadas horizontais, como o lençol freático. Conseqüentemente, o radar tende a filtrar as informações pouco interessantes para a detecção e a localização de artefatos humanos soterrados, como canos. Esse

girado para aumentar significativamente o sinal de eco oriundo de um longo cano fino. Os custos envolvidos em uma sondagem geotomográfica provavelmente inviabilizem o emprego dela para a detecção e a localização de canos. Ademais, essa aplicação geralmente não requer resolução espacial suficientemente elevada para justificar o emprego da geotomografia eletromagnética.

No Capítulo 4, mostrou-se que a interface solo-ar pode influenciar as medidas efetuadas em sondagens geotomográficas. Essa influência pode ser desprezada se as profundidades das antenas forem suficientemente grandes. A Fig. 4.2 permite o conhecimento de quão grandes essas profundidades devem ser. O radar, estando na superfície do solo, pode sondar a parte do meio geofísico que não é investigada pela geotomografia eletromagnética por estar próxima da interface solo-ar. Na Fig. 1.1, essa parte se localiza entre a superfície do solo e o topo da região sondada pela geotomografia eletromagnética. As informações fornecidas pelo radar sobre tal parte do meio geofísico podem ajudar a interpretar as feições superiores dos geotomogramas. Como mostra a Fig. 3.4, tais feições estão na região de baixa densidade de raios, onde a quantidade de artefatos costuma ser maior.

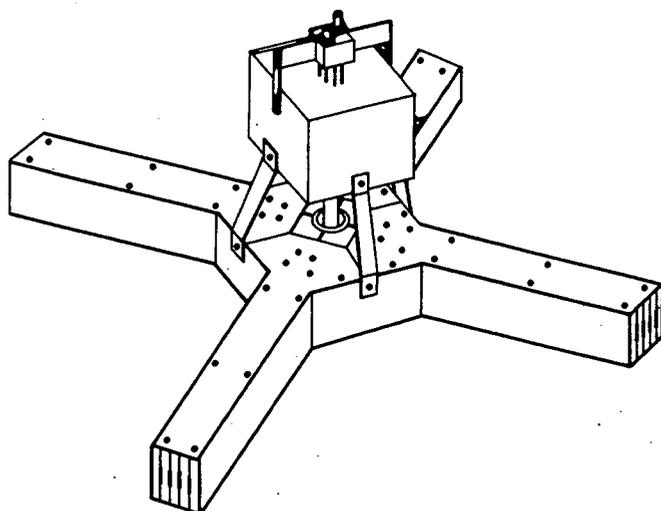


Figura 5.2 - Os dipolos cruzados resistivamente carregados. Esta antena é usada em alguns sistemas de radar de subsuperfície (Caldecott et al., 1988).

O objetivo da realização de furos em um meio geofísico é geralmente permitir o conhecimento detalhado das características originais desse meio. Entretanto, a perfuração causa alterações no meio geofísico (Bigelow, 1997). As pressões elevadas tendem a fazer os fluidos presentes no subsolo afluírem ao furo. A fim de evitar tal fato, o furo é preenchido com lama. A densidade da lama é escolhida de modo a tentar contrabalançar as pressões exercidas pelos fluidos da formação litológica. O equilíbrio entre as pressões da lama e as dos fluidos ambientais raramente acontece. A tendência é a lama do furo adentrar a formação litológica. Esse processo é chamado *invasão*. A porção do meio geofísico que foi alterada através do furo é chamada *zona invadida*. A análise da Fig. 3.4 permite que se conclua que as zonas invadidas são representadas em partes dos geotomogramas que tendem a ser facilmente degradadas por artefatos. O emprego do georadar em furos permite a caracterização detalhada das zonas invadidas, auxiliando a interpretação das feições dos geotomogramas associadas a essas zonas. O georadar emite sinais que são refletidos nas estruturas que se encontram perto do furo onde ele está. Os sinais refletidos são captados pelo georadar. O conhecimento dos sinais emitidos e refletidos permite deduzir as localizações dessas estruturas. Há radares geofísicos que também possibilitam o conhecimento do valor da permissividade elétrica relativa do meio atravessado pelas ondas eletromagnéticas.

É bastante comum o emprego de várias técnicas de sondagem geofísica para caracterizar bem determinada região (Bigelow, 1997). Assim, intenta-se evitar prejuízos com a realização de perfurações infrutíferas. As técnicas de sondagem geofísica disponíveis atualmente, a Geoestatística (Yang, 1997), a Inteligência Artificial (Amari & Cichocki, 1998; Atkinson & Tatnall, 1997; Chang et al., 1997; Haykin, 1996; Lopes et al., 1997d; Lopes et al., 1998b; Mohaghegh et al., 1996; Murai & Omatu, 1997; Wong et al., 1997) e as técnicas secundárias e terciárias de recuperação de poços petrolíferos evitam a realização de tantas perfurações perto

umas das outras, como mostra a Fig. 5.3 (Rahn, 1986). A região mostrada nessa figura é uma anticlinal. A utilidade da geotomografia eletromagnética para as recuperações secundária e terciária de poços petrolíferos foi mencionada na seção 1.1. Essas recuperações estão cada vez mais sendo utilizadas, devido à crescente dificuldade de descobrir reservatórios capazes de produzir petróleo em escala comercial. Um exemplo da importância das técnicas de recuperações secundária e terciária é o fato de elas terem aumentado em, no mínimo, dez anos a expectativa de produção do campo Jay, localizado no nordeste da Flórida. Esse campo passou a produzir diariamente mais de quarenta mil barris de petróleo e mais de um milhão de metros cúbicos de gás.

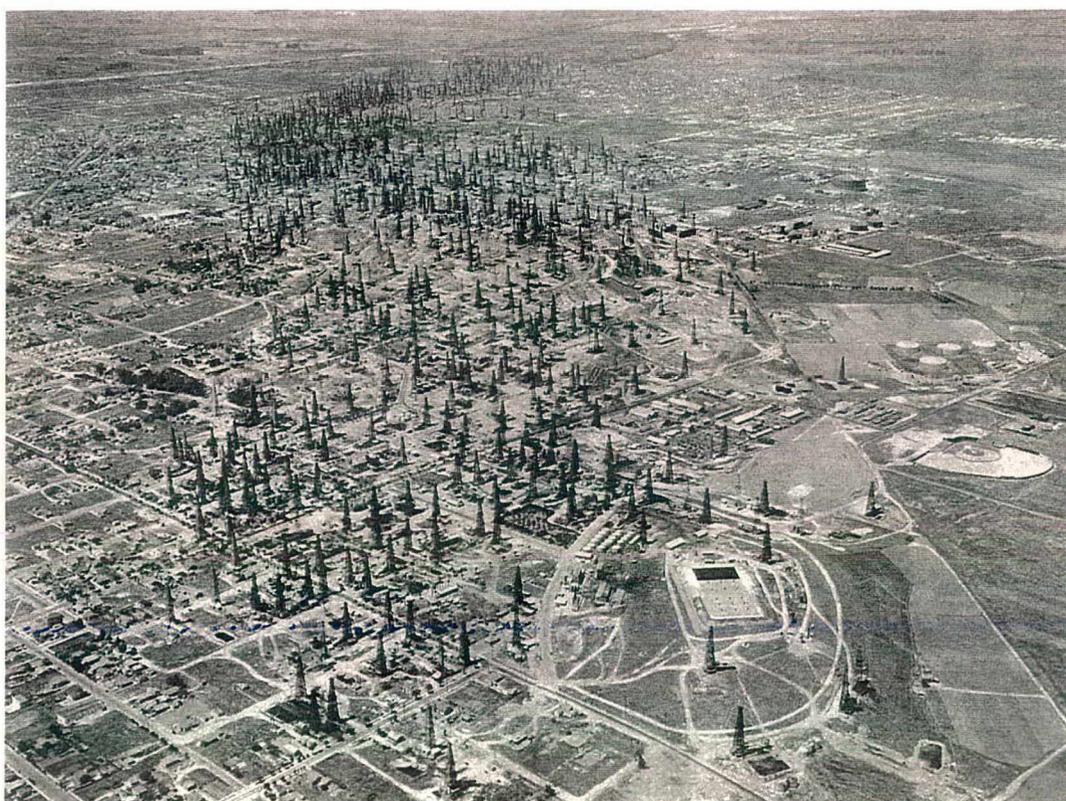


Figura 5.3 - O campo petrolífero Signal Hill, em Long Beach, Califórnia.

5.3. CONCLUSÕES

Nesta seção, apresentam-se comparativamente algumas conclusões genéricas acerca das características da geotomografia eletromagnética e do georadar. Essas conclusões ajudam a esclarecer qual desses métodos é mais indicado em dada situação.

- 1) A geotomografia eletromagnética geralmente emprega acessos ao meio investigado, tais como furos ou galeria de minas. Os acessos são mais facilmente dispensáveis quando o radar de subsuperfície é usado (Vitebskiy et al., 1997).
- 2) A geotomografia eletromagnética geralmente é empregada em aplicações localizadas. O radar de subsuperfície é usado em aplicações localizadas ou não.
- 3) A resolução espacial fornecida pela geotomografia eletromagnética costuma ser muito maior do que a fornecida pelo radar de subsuperfície.
- 4) As frequências de operação da geotomografia eletromagnética situam-se geralmente entre 1 kHz e 100 MHz (Alumbaugh & Morrison, 1995; Alumbaugh & Newman, 1997; Lopes & Lopes, 1989; Lopes & Lopes, 1994; Lopes et al., 1997a; Lopes et al., 1997b; Lopes et al., 1998a; Newman & Alumbaugh, 1997); as do radar de subsuperfície encontram-se quase sempre entre 500 Hz e 11 GHz (Arcone et al., 1997; Burrell & Peters, 1979; McMechan et al., 1997; Richardson et al., 1997; Roberts & Daniels, 1997; Lopes et al., 1997c; Lopes et al., 1997d; Lopes, 1998; Lopes et al., 1998b).
- 5) Os custos envolvidos nas sondagens realizadas com a geotomografia eletromagnética são geralmente maiores do que os envolvidos nas sondagens efetuadas com o radar de subsuperfície.
- 6) A coleta de dados para a inversão tomográfica é freqüentemente mais demorada do que a coleta de dados para a inversão com o radar de subsuperfície.

- 7) As informações fornecidas pelo radar de subsuperfície podem facilitar a interpretação das imagens reconstruídas pela geotomografia eletromagnética.
- 8) Enquanto o radar de subsuperfície serve tanto para o reconhecimento como para a caracterização de uma região, a geotomografia eletromagnética *costuma servir somente* para a caracterização de uma região. No entanto, a geotomografia eletromagnética geralmente caracteriza um meio de forma mais detalhada do que o radar de subsuperfície.
- 9) Nenhum método de sondagem eletromagnética é capaz de apresentar resolução espacial maior do que a obtida com a geotomografia eletromagnética, ao ser usado para investigar áreas extensas e razoavelmente profundas.

As conclusões apresentadas são genéricas. Elas refletem tendências mais do que conceitos rígidos. Por exemplo, a quarta conclusão é verdadeira ao afirmar que as frequências de operação da geotomografia eletromagnética *geralmente* se encontram entre 1 kHz e 100 MHz; mas também é verdade que a geotomografia eletromagnética pode empregar frequências que estejam fora dessa faixa. Prova disso é fornecida por Wilt et al. (1995); eles realizaram experimentos de campo com a geotomografia eletromagnética, empregando a frequência de 512 Hz.

Se a geometria apresentada na Fig. 2.1 for empregada, o radar de subsuperfície, atuando dentro de um furo, pode sondar *as vizinhanças do furo* com resolução espacial mais elevada do que a geotomografia eletromagnética. Entretanto, nenhum *método eletromagnético* de sondagem geofísica é capaz de sondar *a região existente entre os furos* com resolução espacial mais elevada do que a geotomografia eletromagnética, se essa região for muito profunda. A grande profundidade da região impede que ela seja investigada por métodos eletromagnéticos que operem, na superfície do solo, em frequências suficientemente elevadas para que a resolução espacial seja superior à fornecida pela geotomografia eletromagnética (Cherniakov, 1996).

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES

O objetivo principal das simulações é avaliar a capacidade de o método proposto reconstruir imagens de meios geofísicos. O método está descrito, de forma bastante simplificada, na seção 3.5. A Fig. 6.1(a) mostra a imagem verdadeira dos parâmetros elétricos constitutivos do meio simulado. Há uma anomalia central retangular, inserida em uma região cujos valores de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa são 0,44 mS/m e 7,5, respectivamente. Considera-se que $\sigma = 0,67$ mS/m e $\epsilon_r = 10,5$, na anomalia central, indicada pela cor vermelha. Admite-se que $\sigma = 0,22$ mS/m e $\epsilon_r = 4,5$, na região superior, indicada pela cor verde. Na região mais profunda do meio simulado, indicada pela cor preta, os parâmetros elétricos constitutivos são $\sigma = 0,88$ mS/m e $\epsilon_r = 13,5$. Os valores dos parâmetros elétricos constitutivos do meio investigado são típicos de materiais encontrados em reservatórios petrolíferos, para frequências entre 500 kHz e 15 MHz (Daily, 1984; Jesch & McLaughlin, 1984; Laine, 1987). A espessura do meio simulado é igual a oitenta e um metros, e a sua largura é igual a trinta metros.

$\sigma = 0,70$ mS/m e $\epsilon_r = 7,0$ são valores frequentemente encontrados em processos de recuperação de reservatórios petrolíferos, desde que as medições sejam efetuadas entre 800 kHz e 40 MHz (Lopes & Lopes, 1994b). Para que a resolução espacial mínima seja igual a três metros, é preciso que o comprimento de onda seja, no máximo, aproximadamente igual a seis metros. No entanto, o fato de um grande número de trajetórias de ondas eletromagnéticas

atravessar a mesma região causa um amplo ganho de resolução. Conseqüentemente, um comprimento de onda significativamente superior a seis metros pode satisfazer o requisito de resolução espacial prescrito. Para $\sigma = 0,70$ mS/m, $\epsilon_r = 7,0$ e $\lambda = 10$ m, a equação (2.13) fornece $f \cong 11,3$ MHz. Portanto, a resolução espacial mínima de três metros deve ser alcançada se a condição expressa a seguir for satisfeita:

$$f \geq 11,3 \text{ MHz.} \quad (6.1)$$

Admite-se que os acessos laterais ao meio geofísico sejam paralelos. Por isso, emprega-se $\varphi = 0$ na equação (3.2). Os comprimentos das trajetórias foram computados pelo método descrito no parágrafo que sucede a equação (3.2). A anulação de φ causa o aparecimento do termo $|\sin^2 \theta_k|$ na equação (3.2), que pode ser expresso como $|\sin^2 \theta_k| = D^2 / [D^2 + (\Delta y)_k^2]$, onde D é a distância entre os furos e $(\Delta y)_k$ é a diferença de profundidade entre as antenas transmissora e receptora, associada à trajetória k . Evita-se o processamento de dados associados a trajetórias excessivamente longas, restringindo-se θ_k ao intervalo $[45^\circ, 135^\circ]$. Tal restrição equivale aos condicionamentos $|(\Delta y)_k| \leq D$, que, por não envolverem funções trigonométricas, são impostos mais facilmente. Como o meio geofísico é investigado somente pelos lados direito e esquerdo, a reconstrução de feições horizontais é mais difícil de ser efetuada do que a reconstrução de feições verticais. Um dos princípios da tomografia reza que é preciso sondar a região de interesse a partir de direções diferentes. O exercício desse princípio é ameaçado, quando o espectro de ângulos de trajetórias da energia que atravessa a região é estreito. Nesse caso, as imagens reconstruídas freqüentemente apresentam resolução baixa. Por outro lado, o espectro de ângulos de trajetórias excessivamente amplo normalmente causa o domínio do processo reconstrutor pelas informações associadas às trajetórias mais extensas. Alguns

problemas causados por esse domínio estão mencionados na seção 3.2. O comprimento da trajetória mais longa é aproximadamente igual a quarenta e três metros ($\cong 30,0 \text{ m} \times \sec 45^\circ$). Isso equivale a 2,14 profundidades de penetração, o que é uma quantidade bastante razoável para a geotomografia eletromagnética. Uma profundidade de penetração equivale a 20,1 metros, no caso analisado. O recíproco da profundidade de penetração é o fator de atenuação: $\alpha = 0,05 \text{ Np/m}$. Para tal valor, $\sigma = 0,70 \text{ mS/m}$ e $\epsilon_r = 7,0$, a equação (2.2) fornece $f \cong 12,9 \text{ MHz}$. Portanto, as ondas eletromagnéticas conseguem atravessar, no mínimo, 2,14 profundidades de penetração, no meio investigado, se a condição seguinte for satisfeita:

$$f \leq 12,9 \text{ MHz.} \quad (6.2)$$

Os condicionamentos expressos pelas relações (6.1) e (6.2) são simultaneamente satisfeitos se as frequências de operação da geotomografia eletromagnética estiverem no intervalo $11,3 \text{ MHz} \leq f \leq 12,9 \text{ MHz}$. Escolhem-se as seguintes frequências: $f_1 = 11,5 \text{ MHz}$ e $f_2 = 12,5 \text{ MHz}$. A condição expressa analiticamente pela relação (2.12) conduz a $L \gg 1,6$ metros, para $\sigma = 0,70 \text{ mS/m}$, $\epsilon_r = 7,0$ e $f = 11,5 \text{ MHz}$. Essa condição é facilmente satisfeita no caso estudado, pois mesmo as trajetórias mais curtas apresentam comprimentos bem superiores a 1,6 metros.

No projeto de um experimento realizado com a geotomografia eletromagnética, é importante determinar se a interface solo-ar influencia significativamente os dados medidos. Se tal influência for de natureza secundária, então a modelação descrita no Capítulo 3 geralmente conduz a resultados satisfatórios. A equação (2.2) indica que $\alpha \cong 0,05 \text{ Np/m}$, para $\sigma = 0,70 \text{ mS/m}$, $\epsilon_r = 7,0$ e frequências próximas das de operação. Ao longo do caminho direto mostrado na Fig. 4.1, as ondas eletromagnéticas percorrem $\alpha D = 1,5$ profundidades de penetração, pois a distância entre os furos é $D = 30,0$ metros. Deseja-se que a interface solo-ar

modifique os valores medidos em menos do que dez por cento. Portanto, marcando-se o ponto $(\alpha L; \hat{Q}) = (1,5; 0,1)$ na Fig. 4.2, conclui-se que $\text{sen } \theta_i \cong 0,63$. A equação (4.6) indica que $h = 18,5$ metros, para $L = 30,0$ metros e $\text{sen } \theta_i \cong 0,63$. Admitindo-se que $\epsilon_r = 7,0$, as relações (4.7) e (4.9) fornecem $h_B \cong 40$ metros e $h_c \cong 37$ metros, respectivamente. Embora as relações (4.7) e (4.9) só sejam rigorosamente válidas em meios dielétricos, elas fornecem valores aproximados satisfatórios no caso analisado, porque as correntes de deslocamento dominam as correntes de condução. Se a parte superior do meio investigado estiver a mais de dezoito metros e meio abaixo da superfície do solo, pode-se afirmar, com ampla margem de certeza, que as ondas refletidas e refratadas na interface solo-ar modificam, em menos do que dez por cento, as magnitudes dos sinais medidos.

As medições foram efetuadas colocando-se inicialmente ambas as antenas a 1,4 metros abaixo do topo da região simulada. A antena receptora foi deslocada de sua localização inicial até trinta metros mais abaixo, medindo-se, a intervalos de 1,4 metros, tanto a amplitude do sinal cuja frequência era igual a 11,5 MHz, como a mudança de fase induzida pela variação da frequência entre 11,5 MHz e 12,5 MHz. Em seguida, desceu-se a antena transmissora mais 1,4 metros, e a antena receptora foi deslocada de 1,4 metros até 32,8 metros ($= 2 \times 1,4 \text{ m} + 30,0 \text{ m} \times \text{tg } 45^\circ$) abaixo do topo da região investigada, medindo-se, a intervalos de 1,4 metros, os sinais de interesse. As medições continuaram nas outras localizações das antenas. O último dado foi captado quando a antena transmissora ficou a 79,8 metros abaixo do topo da região sondada. Essa antena ocupou cinquenta e sete localizações distintas em um dos acessos à região de interesse. Devido à imposição dos condicionamentos $\left| (\Delta y)_k \right| \leq D$, as medições restringiram-se aos sinais que chegavam à antena receptora quando ela se encontrava em profundidades que variavam entre -30,0 metros e +30,0 metros em relação às profundidades da antena transmissora.

A geração de dados simulados realistas é de importância suprema para o teste e o melhoramento de métodos de inversão geofísica (Lopes & Lopes, 1991; Lopes & Lopes, 1992; Lopes & Lopes, 1993; Lopes et al., 1997a; Lopes, 1998; Lopes et al., 1998a). A influência exercida sobre as inversões por ruídos ambientais, ruídos instrumentais e limitações do modelo foi avaliada mediante a degradação proposital do conjunto original de dados. O relacionamento entre o dado original, y_k , e o dado degradado por ruído aleatório e uniformemente distribuído sobre um percentual n de y_k , é expresso analiticamente por (Lopes & Lopes, 1994a)

$$y'_k = y_k \left[1 + (2s_k - 1) n / 100 \right], \quad (6.3)$$

onde s_k é uma variável que assume valores randômicos no intervalo $0 \leq s_k \leq 1$. Se, por exemplo, $n = 30\%$, então os dados usados nas inversões correspondem aos dados originais, modificados em até $\pm 30\%$. A equação (6.3) indica, coerentemente, que $y'_k = y_k$ quando $n = 0$. O procedimento sintetizado pela equação (6.3) é metodologicamente aceito como correto, para a geração de dados empregados em simulações computacionais que envolvam a geotomografia eletromagnética (Lopes & Lopes, 1994a).

As Figs. 6.1(b)–6.1(w) são imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica (σ) e de permissividade elétrica relativa (ϵ_r). As legendas dessas figuras indicam os tipos de imagem (σ ou ϵ_r), as técnicas empregadas para regularizar o problema inverso (filtro de imagens adaptativo, segmentação de imagens, ou ambas essas técnicas), os valores da variável de pesagem (τ) e os valores do nível de ruído nos dados (n). Nessas figuras, cada pixel necessitou de apenas três iterações do algoritmo não linear descrito na seção 2.2, para ser reconstruído. Todas essas imagens envolveram somente quinze iterações do algoritmo expresso pela equação (3.8).

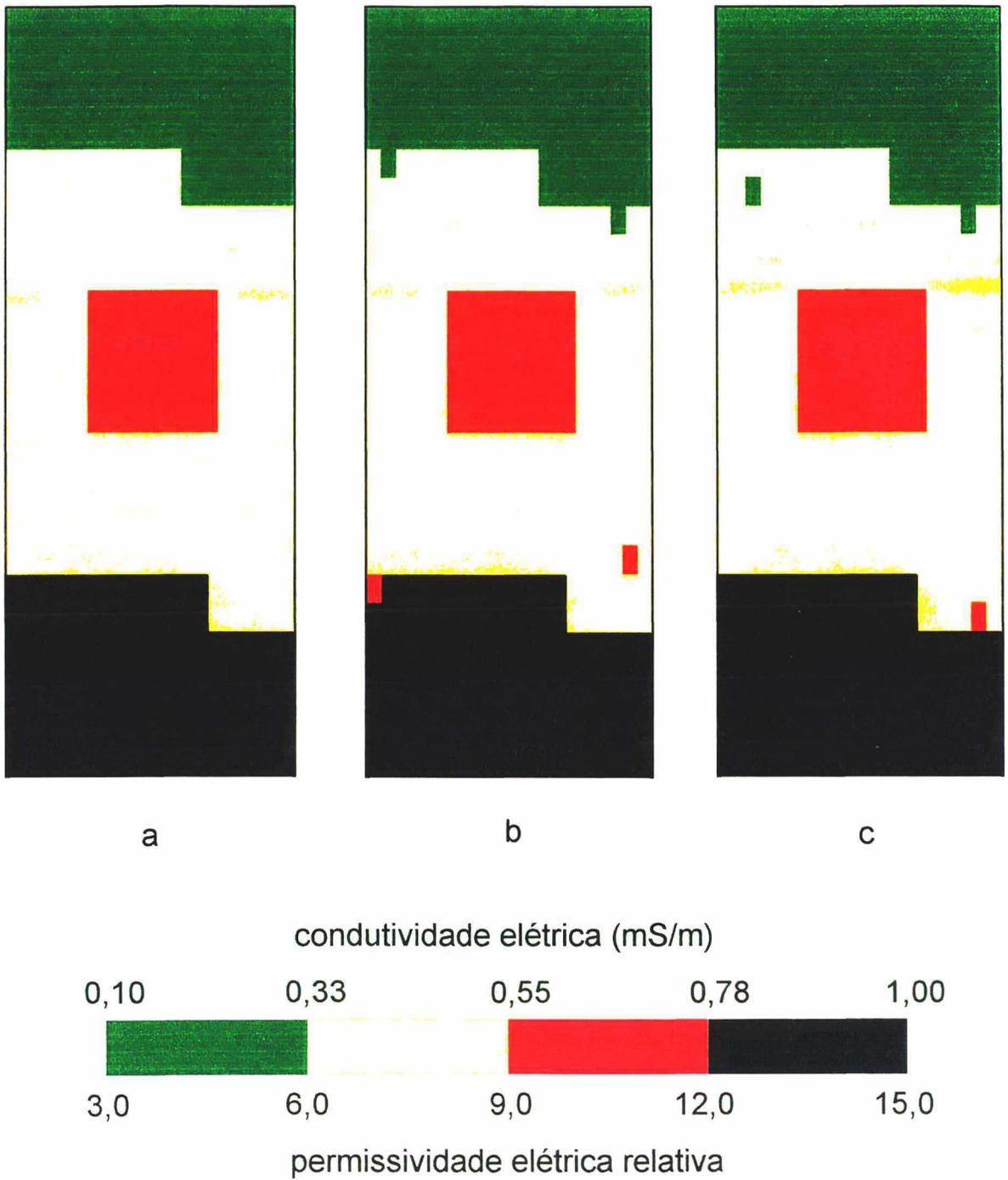


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (a) Fantasmas. (b) e (c) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Usou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 10\%$.

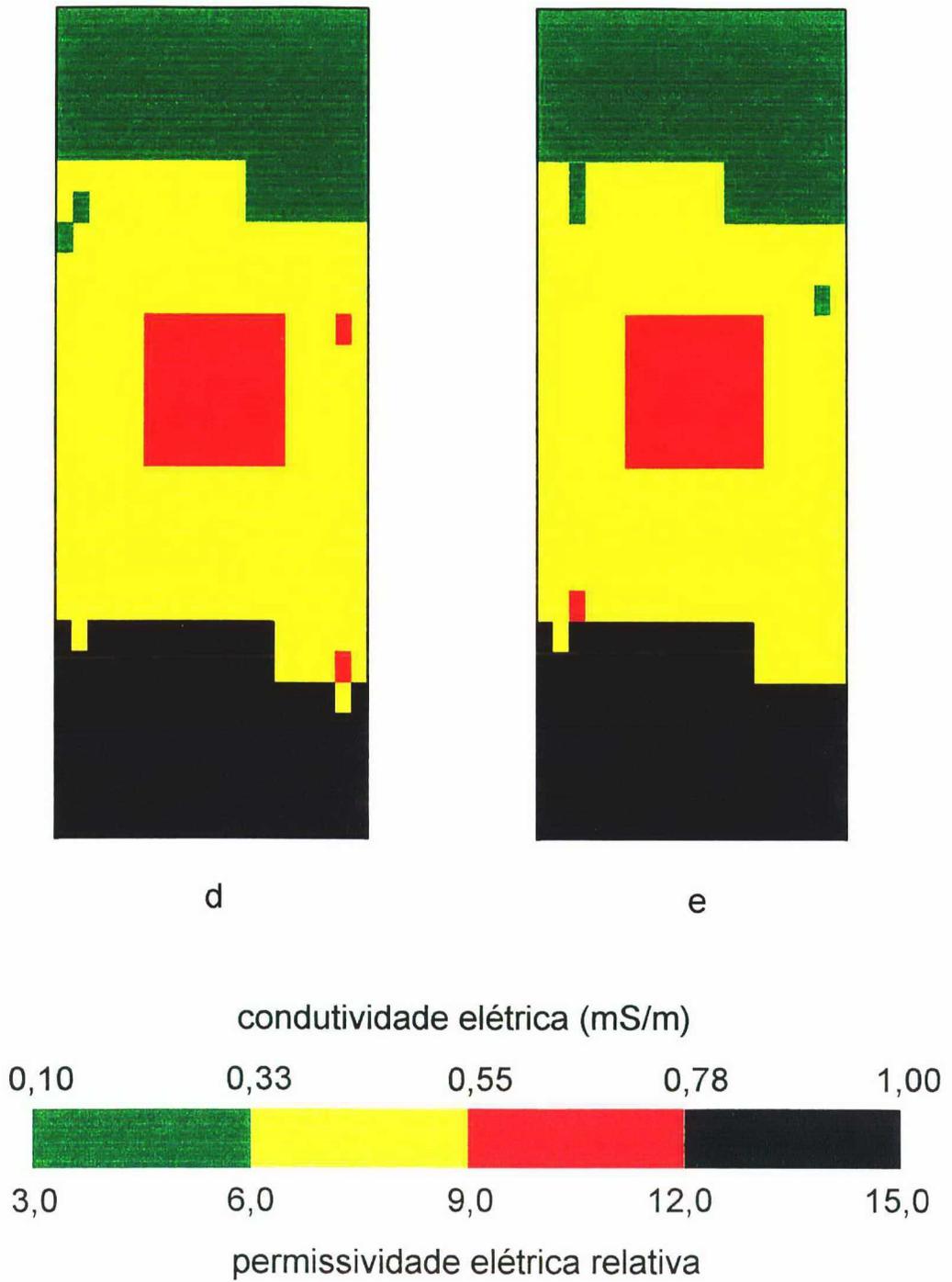


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (d) e (e) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Usou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 20\%$.

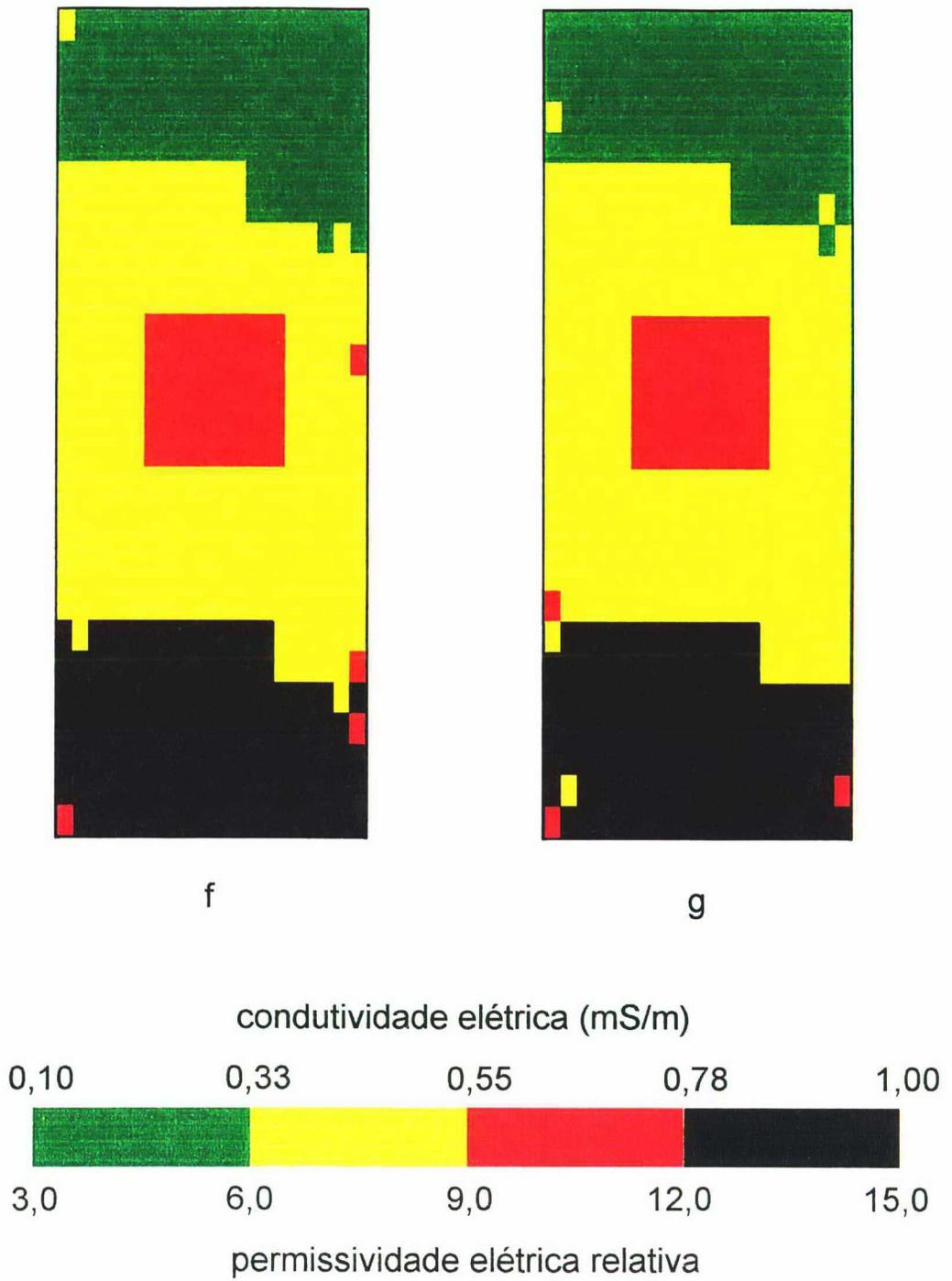


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (f) e (g) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Usou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 30\%$.

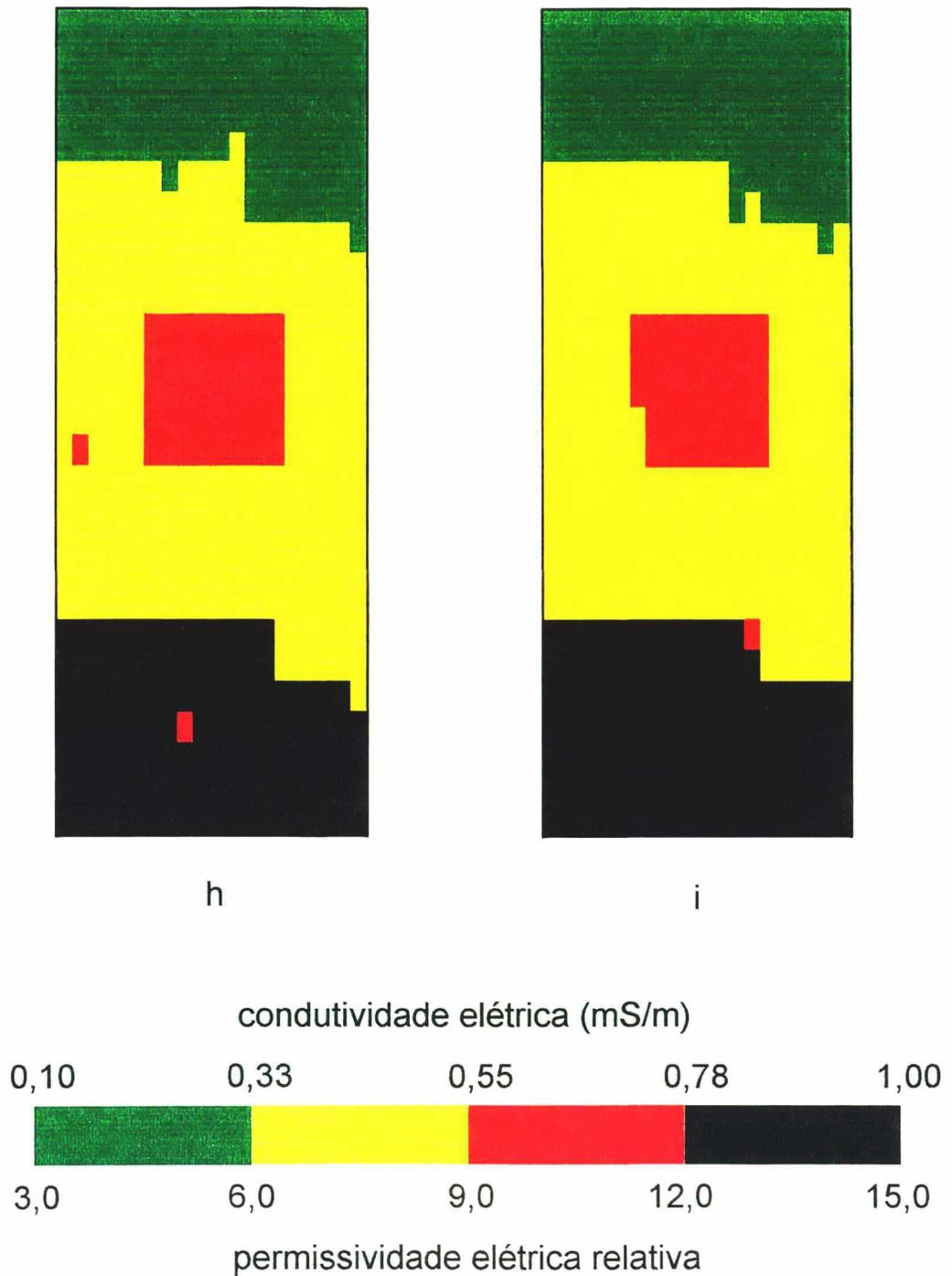


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (h) e (i) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 10\%$.

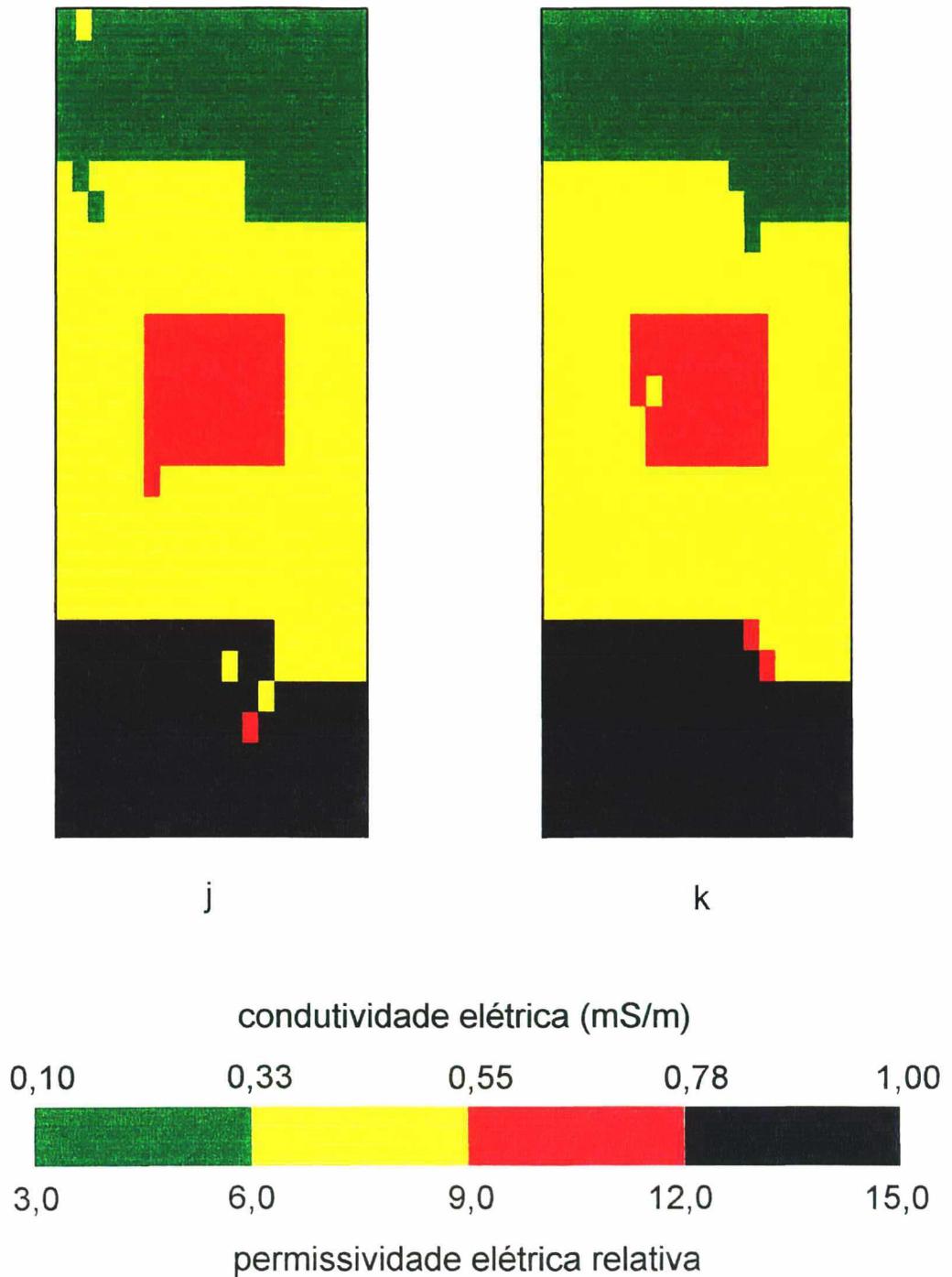


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (j) e (k) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 20\%$.

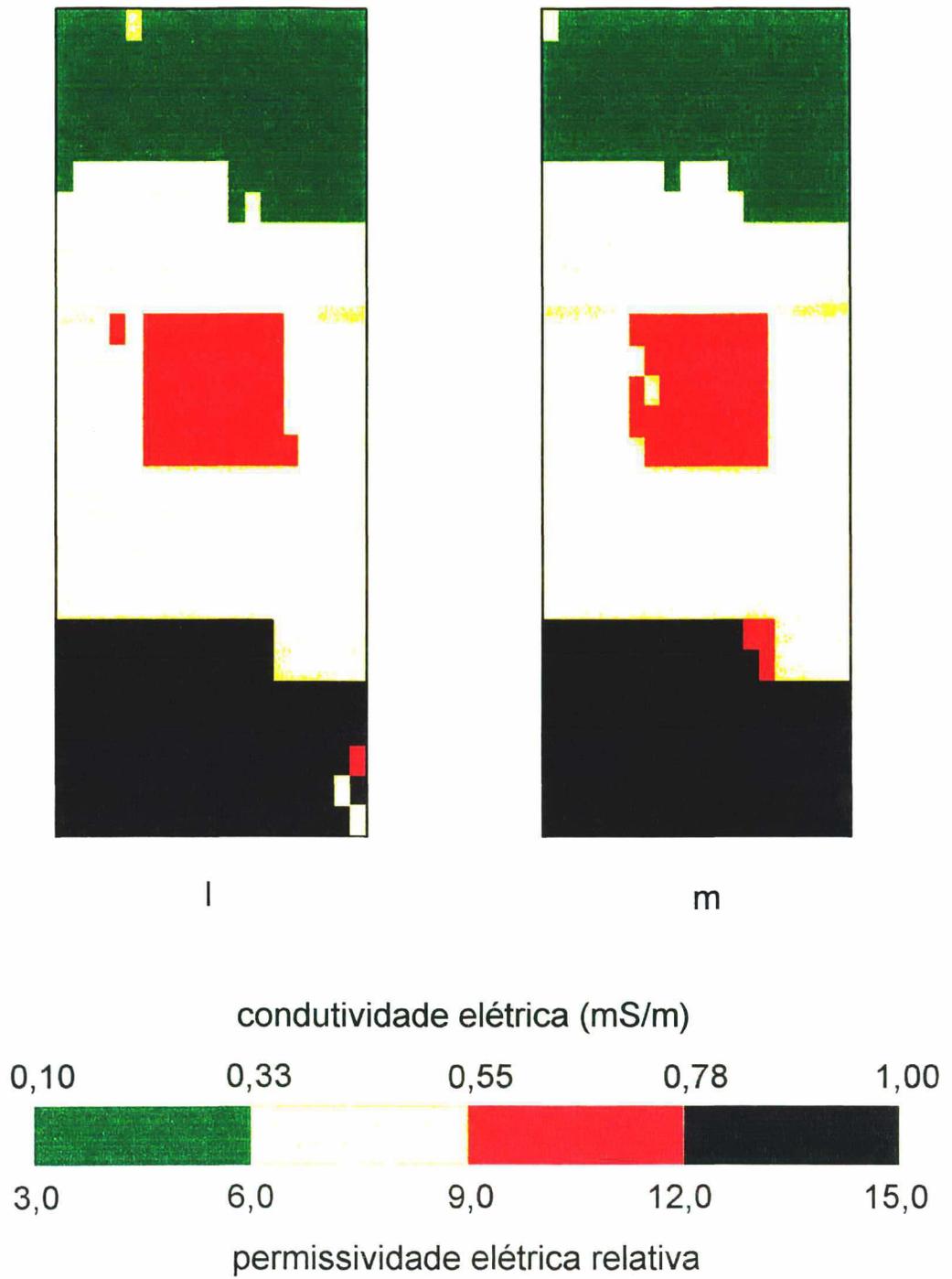


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (l) e (m) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 30\%$.

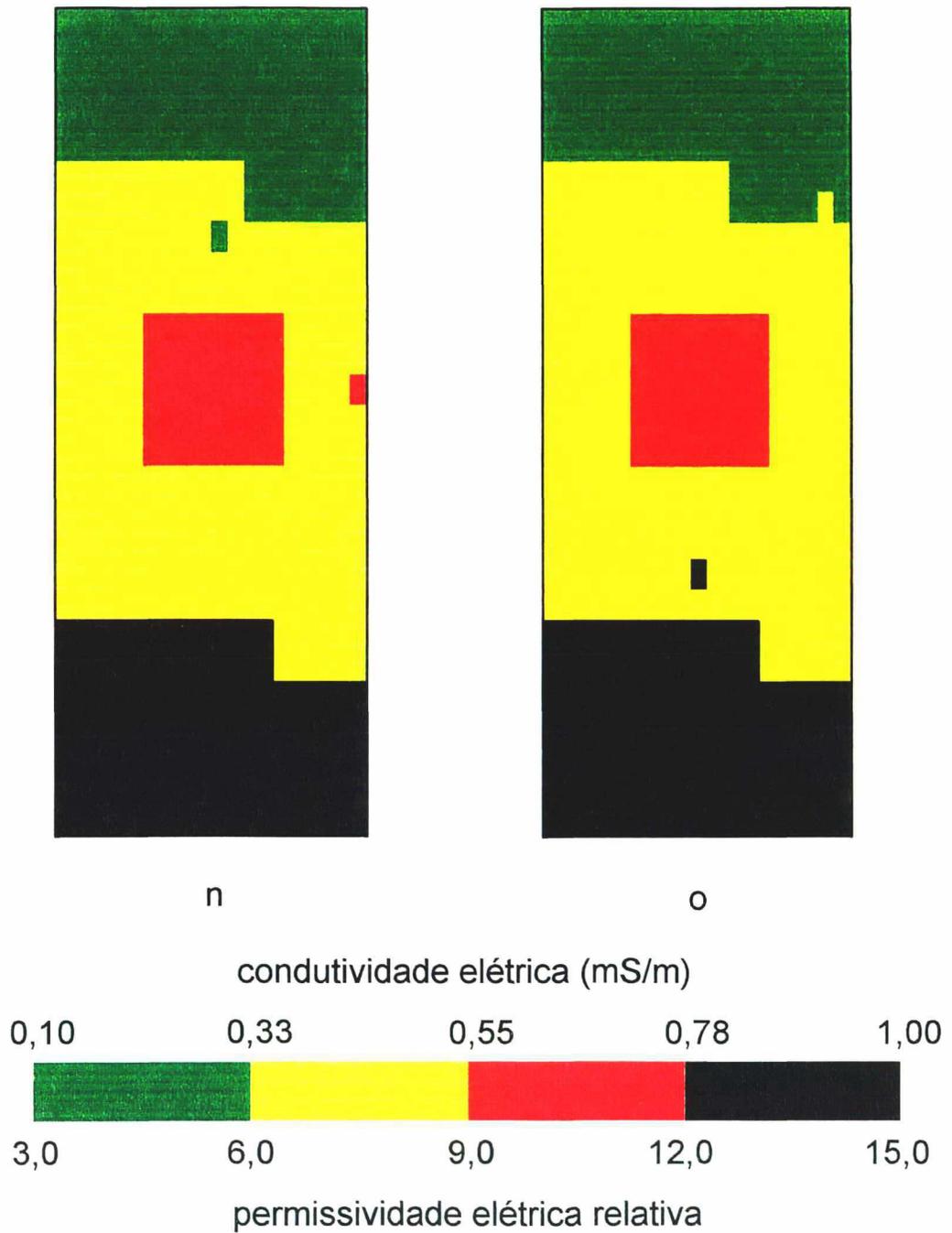


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (n) e (o) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Empregou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 10\%$.

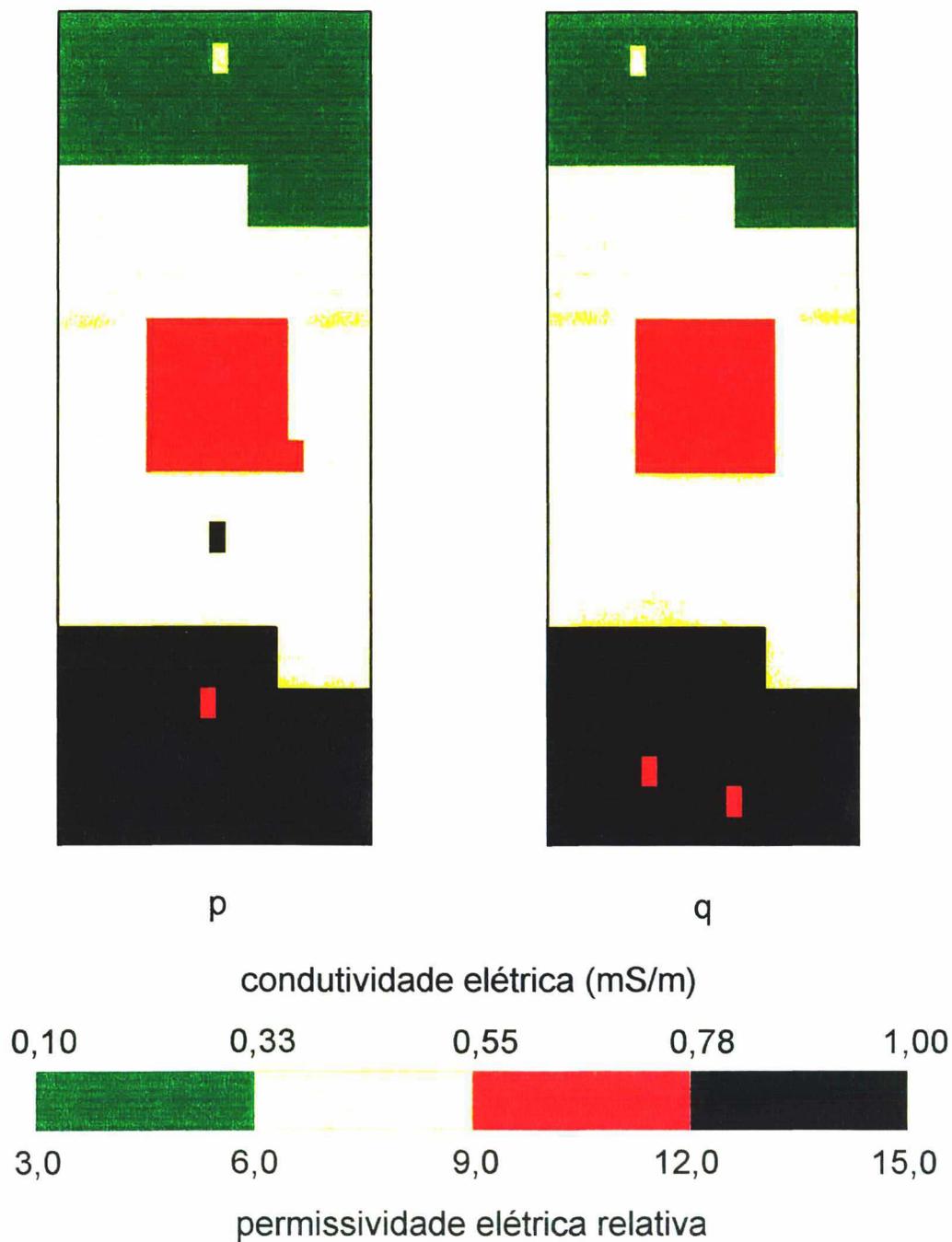


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (p) e (q) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Empregou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 20\%$.

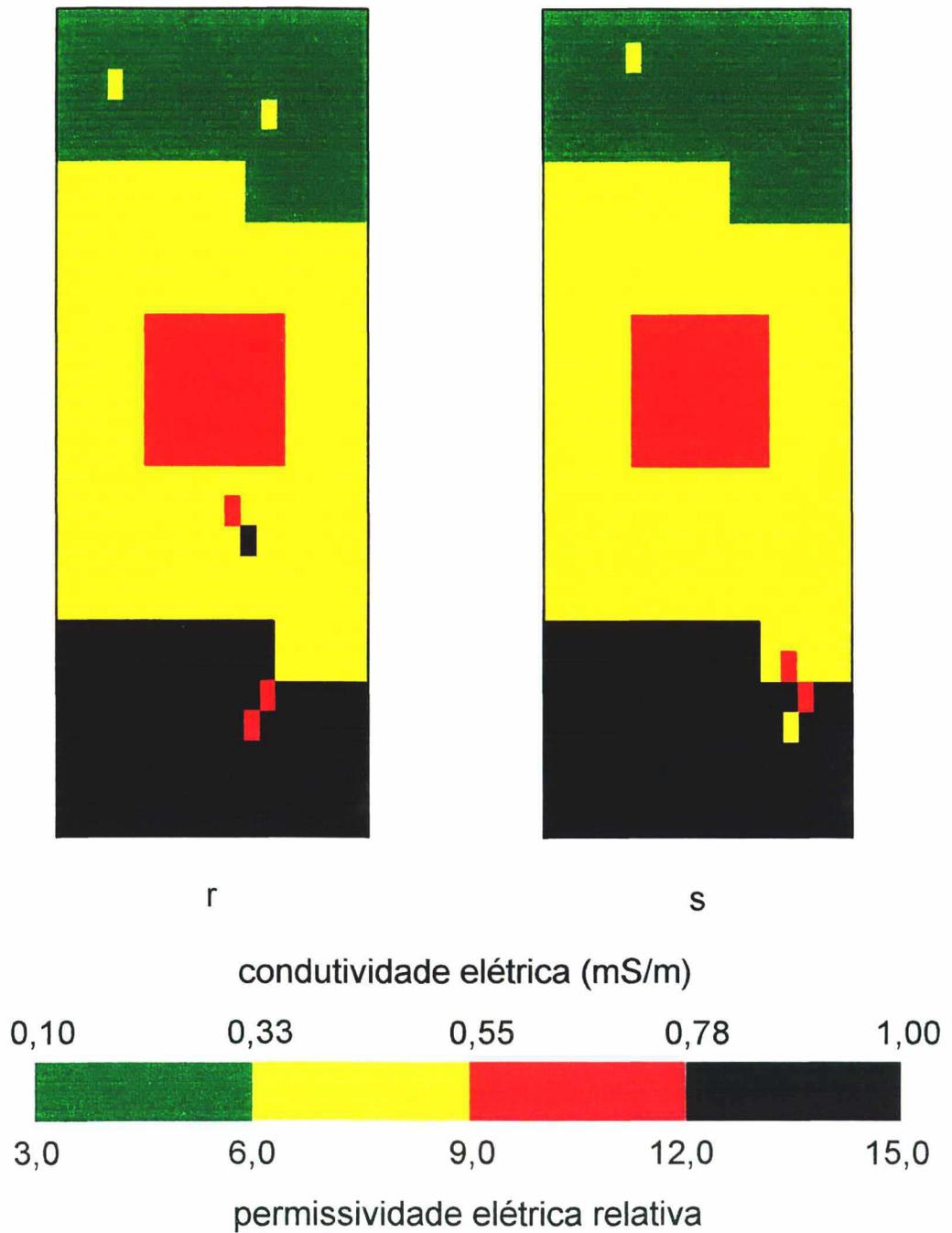


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (r) e (s) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Empregou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 2$. $n = 30\%$.

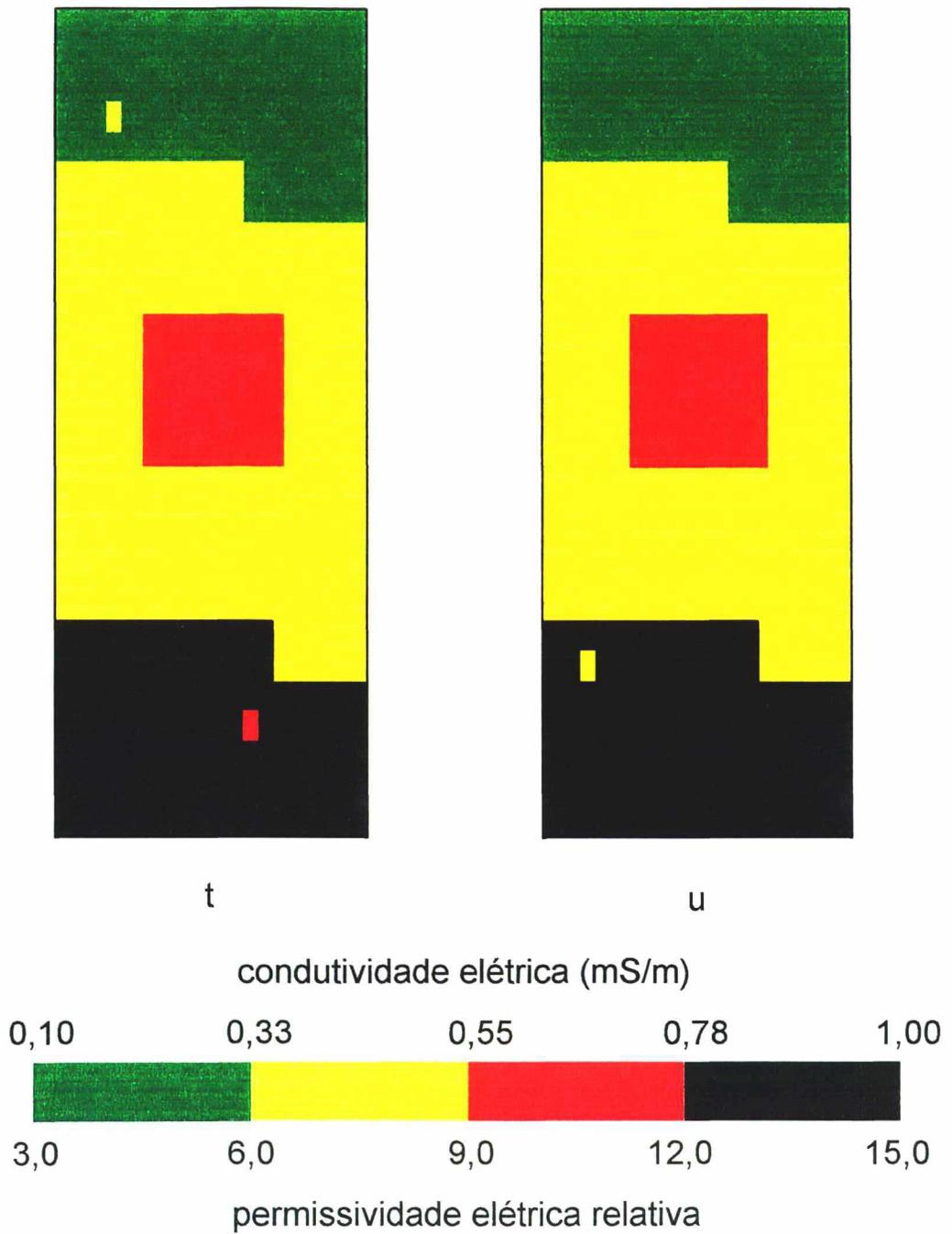


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (t) e (u) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Empregou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 4$. $n = 10\%$.

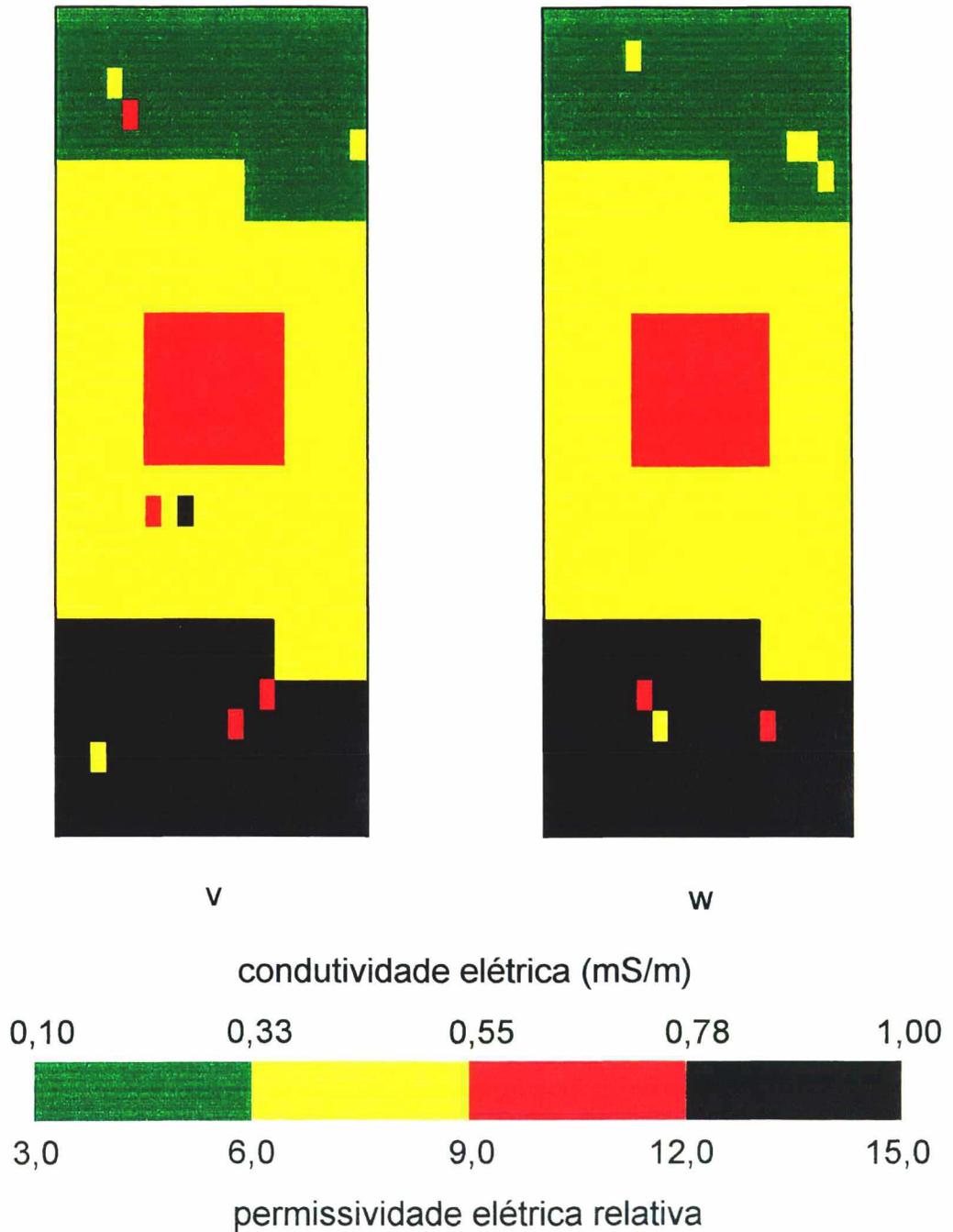


Figura 6.1 - Resultados das reconstruções das imagens. (v) e (w) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente. Empregou-se o filtro de imagens adaptativo a cada cinco iterações do algoritmo tomográfico. Usou-se o algoritmo iterativo de segmentação de imagens durante as cinco iterações finais do algoritmo tomográfico. $\tau = 4$. $n = 30\%$.

A resolução da geotomografia eletromagnética é função de muitos fatores. Alguns deles são (Lopes & Lopes, 1994b): a faixa de frequências de operação, as dimensões dos pixéis, as relações sinal-ruído dos dados, a separação entre os acessos ao meio investigado, as distâncias entre as localizações das antenas transmissora e receptora nesses acessos, o desempenho do algoritmo de reconstrução de imagens, as distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica do meio em questão, e o grau de adequação do modelo à realidade geofísica. É patente que a resolução digital não pode ser melhor do que um pixel.

Uma estimativa razoável para a resolução digital da parte de uma imagem abrangida por uma janela é dada por $R = \text{Int}(0,5 + r^{-1})$, onde $\text{Int}(\bullet)$ denota a parte inteira do argumento; $r = n_c/n_t$ é o índice de resolução; n_c é o número de pixéis reconstruídos corretamente, contidos na janela; e n_t é o número total de pixéis existentes na janela. A melhor resolução ocorre para $r = 1$ e $R = 1$ pixel. Nesse caso, os pixéis compreendidos pela janela estão reconstruídos corretamente ($n_t = n_c$). A pior resolução acontece para $r = 0$. Nessa situação, considera-se que todos os pixéis contidos na janela estejam errados ($n_c = 0$). Portanto, R tende a assumir um valor bem grande. Em suma, r varia entre zero e a unidade; e R varia entre um pixel e um número grande de pixéis. Essa medida digital de resolução se baseia nos mesmos princípios da medida descrita por Ramirez et al. (1993). A medida proposta permite estimar a resolução local ou globalmente, dependendo do tamanho da janela. Se a janela abarcar todos os pixéis de um tomograma, então R pode ser interpretado como a *resolução média*. A determinação do número de pixéis considerados errados em uma janela, n_e , é importante para a realização de avaliações de resolução, porque $r = 1 - n_e/n_t$.

A distribuição de artefatos é encontrada subtraindo-se o fantasma do tomograma, e aplicando-se uma filtragem baseada em um critério de disparo. Nos fantasmas de condutividade

elétrica e de permissividade elétrica relativa, mostrados na Fig. 6.1(a), as amplitudes dos pixels assumem somente os valores centrais dos intervalos da legenda. Por exemplo, todos os pixels amarelos da Fig. 6.1(a) representam valores de condutividade elétrica iguais a 0,44 mS/m e valores de permissividade elétrica relativa iguais a 7,5. O comprimento de cada intervalo da legenda de permissividade elétrica relativa é $3 = 2t$. O comprimento de cada intervalo da legenda de condutividade elétrica é aproximadamente igual a $0,22 \text{ mS/m} = 2t$. Nas imagens apresentadas nas Figs. 6.1(a)–6.1(w), os pixels errados satisfazem a condição $|x_{ij}^n - x_{ij}| > t$, onde t é o limiar de disparo. t é igual a 1,5, para imagens de permissividade elétrica relativa; e t é igual a 0,11 mS/m, para imagens de condutividade elétrica.

As Figs. 6.1(b) e 6.1(h) são soluções distintas para o mesmo problema inverso. Afirmação semelhante se aplica às Figs. 6.1(c) e 6.1(i). Muitas simulações indicaram que existem vários modelos que satisfazem os condicionamentos impostos pelos dados, com níveis diferentes de acurácia. Conseqüentemente, cada inversão conjugada apresenta várias soluções. As razões seguintes contribuíram para reduzir a ambigüidade existente nos problemas inversos tratados aqui.

- 1) O número de trajetórias das ondas eletromagnéticas era significativamente maior do que o número de células de cada imagem reconstruída. Isso foi conseguido pelo emprego de distâncias relativamente pequenas (1,4 metros) entre as localizações sucessivas das antenas, em cada acesso lateral ao meio investigado. O aumento da razão entre o número de trajetórias e o número de pixels causa o aumento da razão entre o número de condicionamentos e o número de incógnitas, o que permite o melhor condicionamento do problema inverso.
- 2) A altura de cada pixel foi consideravelmente maior do que a sua largura (3,0 metros

- × 1,5 metros). Reduziu-se assim a ambigüidade que a aproximação de raios retilíneos introduzia nas inversões.
- 3) Reduziu-se a influência das informações associadas às trajetórias mais extensas sobre as inversões não só pela restrição da faixa de orientações das trajetórias ($45^\circ \leq \theta_k \leq 135^\circ$), mas também pelo ajuste da variável de pesagem τ na equação (3.8).
 - 4) O método de inversão (= algoritmo tomográfico + filtro de imagens adaptativo + algoritmo iterativo de segmentação de imagens + algoritmo não linear) não era significativamente afetado por influências secundárias exercidas sobre cada dado. Como o método de inversão enfatizava as tendências impostas por todo o conjunto de dados, as imagens reconstruídas não eram seriamente degradadas por artefatos, mesmo quando níveis elevados de ruído estavam presentes nos dados.
 - 5) Variações de fase com a frequência e amplitudes foram invertidas conjuntamente, o que condicionou as imagens reconstruídas de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa mais fortemente do que as inversões individuais.

A significância de certa feição reconstruída pode ser avaliada observando-se se ela está ou não está presente na maioria de soluções do problema inverso. A coincidência espacial dos contornos das feições existentes nas imagens de condutividade elétrica e nas imagens de permissividade elétrica relativa ajuda a identificar artefatos. A interpretação conjugada dos resultados envolve a observação das semelhanças e das diferenças existentes entre ambos os tipos de imagem reconstruída.

A Tabela 6.1 apresenta várias características das imagens reconstruídas. A distância euclidiana é expressa analiticamente por (Lopes & Lopes, 1989; Lopes & Lopes, 1992; Lopes et al., 1997a)

$$\delta = \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (x_{ij}^n - x_{ij})^2 / (IJ) \right]^{1/2}, \quad (6.5)$$

onde x_{ij}^n e x_{ij} são, respectivamente, a amplitude reconstruída e a amplitude real do pixel (i, j) . Quanto menor a distância euclidiana, maior costuma ser a acurácia da imagem reconstruída. Analisando-se as Figs. 6.1(a)–6.1(w) e a Tabela 6.1, conclui-se que os melhores geotomogramas geralmente estão associados aos menores números de pixéis considerados errados (n_e), bem como aos maiores índices de resolução (r). A resolução média, ou global, de cada uma das imagens reconstruídas, apresentadas nas Figs. 6.1(b)–6.1(w), é igual a um pixel. Esse valor de resolução foi calculado através da relação $R = \text{Int}(0,5 + r^{-1})$. Ele é consistente com o resultado que se obtém pela avaliação visual dessas imagens. A resolução espacial local é igual a dois pixéis na divisão entre a região preta e a região amarela, perto da extremidade direita da Fig. 6.1(f). Tal conclusão, obtida através da relação mencionada anteriormente, é facilmente comprovada pela análise visual. As melhores reconstruções estão mostradas nas Figs. 6.1(t) e 6.1(u). Elas envolveram o filtro de imagens adaptativo, a técnica de segmentação iterativa, o menor nível de ruído nos dados ($n = 10\%$) e a variável de pesagem $\tau = 4$. A influência desse parâmetro sobre os resultados das inversões bidimensionais fica evidente quando as Figs. 6.1(n) e 6.1(o) são comparadas às Figs. 6.1(t) e 6.1(u), respectivamente. Essa influência é também observada quando as Figs. 6.1(r) e 6.1(s) são respectivamente comparadas às Figs. 6.1(v) e 6.1(w). Tais comparações mostram que resultados melhores são obtidos, empregando-se $\tau = 2$ quando o nível de ruído nos dados é elevado; em caso contrário, deve-se empregar $\tau = 4$.

As Figs. 6.1(b)–6.1(g) foram reconstruídas sem a utilização da técnica iterativa de segmentação de imagens, mas o filtro de imagens adaptativo foi empregado. Os artefatos tendem a se concentrar perto das bordas dessas imagens não só porque, em tais regiões, o filtro

não consegue correlacionar a amplitude de cada pixel às amplitudes de relativamente muitos pixels circunvizinhos, mas também porque a densidade de raios é menor lá do que nas outras regiões das imagens. Cada imagem reconstruída, mostrada nas Figs. 6.1(a)–6.1(w), possui vinte pixels de largura e vinte e sete pixels de altura. A janela utilizada pela técnica iterativa de segmentação de imagens possuía doze pixels de largura e dezenove pixels de comprimento. A essa janela se associou a região de suporte **A**, mostrada esquematicamente na Fig. 3.4. As Figs. 6.1(h)–6.1(m) foram reconstruídas com o auxílio da técnica de segmentação de imagens, mas não com a ajuda do filtro de imagens adaptativo. Comparando-se essas figuras às respectivas Figs. 6.1(b)–6.1(g), observa-se, naquelas figuras, a redução da quantidade de artefatos localizados perto das extremidades. As Figs. 6.1(n)–6.1(w) ilustram os benefícios da integração do filtro adaptativo e da técnica de segmentação no processo de reconstrução de imagens. Essas imagens estão relativamente pouco degradadas por artefatos, e os contornos da maioria das feições reconstruídas estão preservados.

As Figs. 6.2(a) e 6.2(b) foram reconstruídas pelo algoritmo de Dines e Lytle, que é expresso pela equação (3.18). O nível de ruído associado a essas reconstruções foi $n = 30\%$. Aplicou-se o mesmo filtro usado por Dines e Lytle (Dines & Lytle, 1979), a cada cinco iterações do algoritmo sintetizado pela equação (3.18). Uma breve descrição desse filtro é feita no início da seção 3.3. As Figs. 6.2(a), 6.1(f), 6.1(l), 6.1(r) e 6.1(v) são geotomogramas de condutividade elétrica, que foram gerados empregando-se o mesmo nível de ruído ($n = 30\%$). As Figs. 6.2(b), 6.1(g), 6.1(m), 6.1(s) e 6.1(w) são imagens de permissividade elétrica relativa, que foram reconstruídas utilizando-se $n = 30\%$. A Tabela 6.2 indica que os valores de distância euclidiana (δ) e os valores de número de pixels considerados errados (n_e), referentes às Figs. 6.2(a) e 6.2(b), superam os valores, mostrados na Tabela 6.1, associados às respectivas figuras que envolveram o mesmo nível de ruído.

Tabela 6.1 - Características das imagens reconstruídas pelas técnicas propostas.

FIGURA	GRANDEZA RECONSTRUÍDA	MÉTODO DE REGULARIZAÇÃO	τ	$n(\%)$	δ	n_e (pixel)	r
6.1(b)	σ	filtragem	2	10	0,32 mS/m	4	0,9926
6.1(c)	ϵ_r	filtragem	2	10	0,72	3	0,9944
6.1(d)	σ	filtragem	2	20	0,37 mS/m	6	0,9889
6.1(e)	ϵ_r	filtragem	2	20	0,83	5	0,9907
6.1(f)	σ	filtragem	2	30	0,40 mS/m	9	0,9833
6.1(g)	ϵ_r	filtragem	2	30	0,97	8	0,9852
6.1(h)	σ	segmentação	2	10	0,34 mS/m	6	0,9889
6.1(i)	ϵ_r	segmentação	2	10	0,81	5	0,9907
6.1(j)	σ	segmentação	2	20	0,43 mS/m	7	0,9870
6.1(k)	ϵ_r	segmentação	2	20	0,95	7	0,9870
6.1(l)	σ	segmentação	2	30	0,48 mS/m	10	0,9815
6.1(m)	ϵ_r	segmentação	2	30	1,02	9	0,9833
6.1(n)	σ	filtragem e segmentação	2	10	0,24 mS/m	2	0,9963
6.1(o)	ϵ_r	filtragem e segmentação	2	10	0,53	2	0,9963
6.1(p)	σ	filtragem e segmentação	2	20	0,32 mS/m	4	0,9926
6.1(q)	ϵ_r	filtragem e segmentação	2	20	0,74	3	0,9944
6.1(r)	σ	filtragem e segmentação	2	30	0,37 mS/m	6	0,9889
6.1(s)	ϵ_r	filtragem e segmentação	2	30	0,83	4	0,9926
6.1(t)	σ	filtragem e segmentação	4	10	0,18 mS/m	2	0,9963
6.1(u)	ϵ_r	filtragem e segmentação	4	10	0,44	1	0,9981
6.1(v)	σ	filtragem e segmentação	4	30	0,56 mS/m	8	0,9852
6.1(w)	ϵ_r	filtragem e segmentação	4	30	0,93	7	0,9870

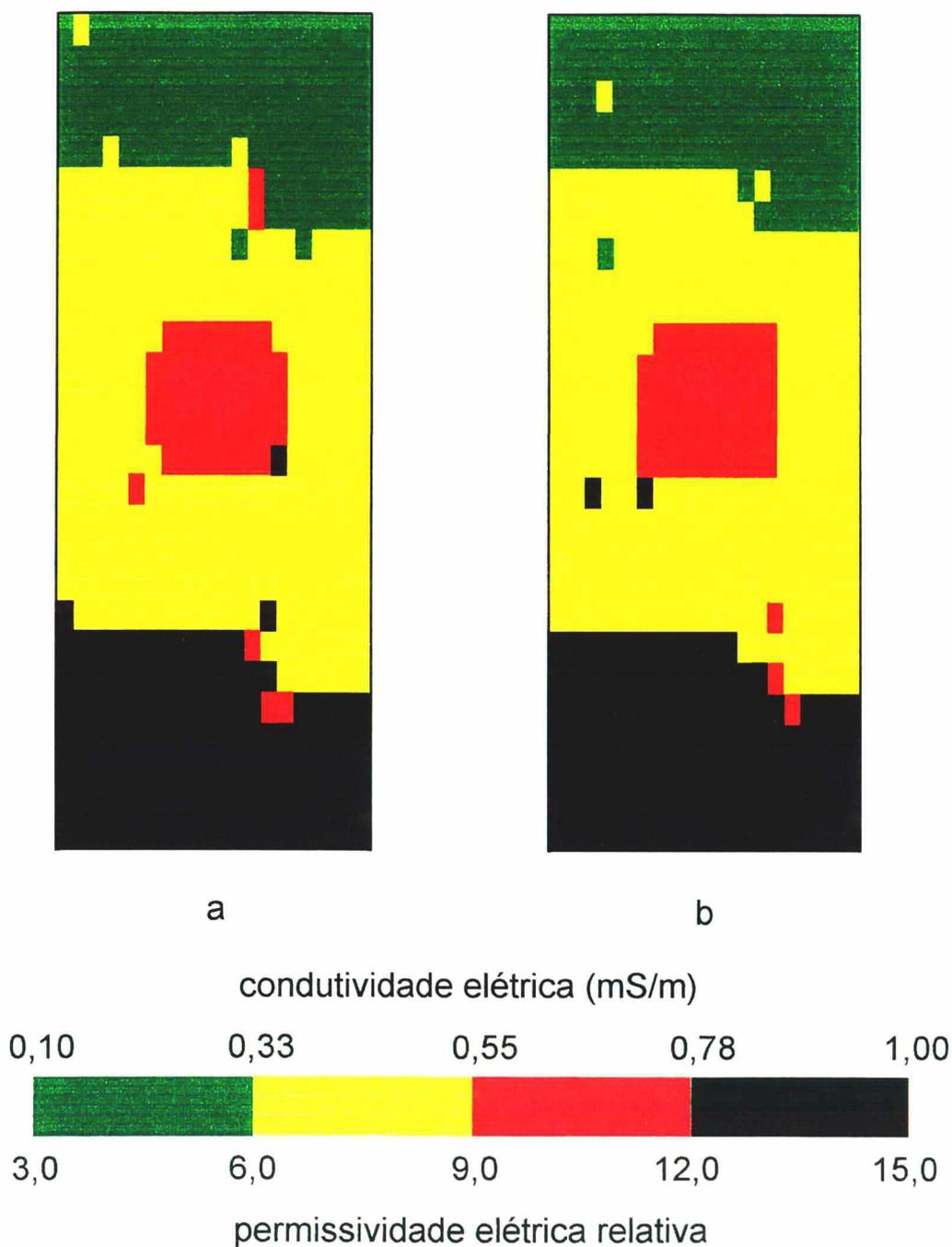


Figura 6.2 - Resultados das reconstruções das imagens, efetuadas pelo método proposto por Dines e Lytle (Dines & Lytle, 1979). (a) e (b) Imagens reconstruídas das distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa, respectivamente, após 15 iterações do algoritmo tomográfico de Dines e Lytle. Empregou-se a janela com 3×3 pixéis a cada cinco iterações desse algoritmo. $n = 30\%$.

Tabela 6.2 - Características das imagens reconstruídas pelo método empregado por Dines e Lytle.

FIGURA	GRANDEZA RECONSTRUÍDA	MÉTODO DE REGULARIZAÇÃO	$n(\%)$	δ	n_e (pixel)	r
6.2(a)	σ	filtragem não seletiva, efetuada com janela composta de 3×3 pixéis	30	0,68 mS/m	18	0,9667
6.2(b)	ε_r	filtragem não seletiva, efetuada com janela composta de 3×3 pixéis	30	1,47	12	0,9778

Tanto as Figs. 6.2(a) e 6.2(b) quanto os resultados sintetizados pela Tabela 6.2 foram cuidadosamente escolhidos, para ilustrar a superioridade do método de reconstrução proposto nesta tese sobre o método usado por Dines e Lytle. Omitem-se muitos outros resultados que atestam essa superioridade, por motivo de concisão. O algoritmo tomográfico padrão de Dines e Lytle, utilizado nas simulações descritas neste capítulo, é dado pela equação (3.18). Lopes et al. (1997a) generalizaram esse algoritmo padrão, através da inclusão da variável de pesagem. Além disso, eles desenvolveram uma versão multiplicativa do algoritmo generalizado de Dines e Lytle. Essa versão é sintetizada pela equação (3.8).

CAPÍTULO 7

DISCUSSÃO

A dificuldade de encontrar reservatórios petrolíferos novos, a demanda crescente por derivados de petróleo, e os aumentos no preço do petróleo causaram um aumento no número de poços de exploração. Muitos desses poços são perfurados perto uns dos outros, para aumentar as chances de encontrar óleo e gás. A separação entre os furos é inferior a trinta e cinco metros, em muitas situações em que a geotomografia eletromagnética é empregada para monitorar processos de recuperações secundária e terciária de reservatórios petrolíferos. Quando a separação entre os furos é maior do que trinta e cinco metros, os encurvamentos das trajetórias das ondas eletromagnéticas podem ser significativos, dependendo das características do reservatório. Nesse caso, frequências menores costumam ser empregadas, para impedir que ruídos mascarem os sinais de interesse. A redução das frequências de operação geralmente causa a diminuição da resolução das imagens de permissividade elétrica. Quando as frequências de operação são baixas, o domínio dos efeitos de condução elétrica sobre o mecanismo de propagação das ondas eletromagnéticas pode ser exagerado, o que inviabiliza a reconstrução de imagens da distribuição de permissividade elétrica.

Os programas de recuperações secundária ou terciária de reservatórios petrolíferos são geralmente aplicados quando a produção primária está quase terminando, embora os reservatórios ainda contenham uma quantidade de petróleo que possa ser lucrativamente explorada, mediante o emprego de certas estimulações. A injeção de vapor no reservatório e a

combustão *in situ* podem reduzir a viscosidade dos óleos pesados. Os óleos leves podem ser conduzidos mais facilmente para os poços de produção do que os óleos pesados. Algumas partes do reservatório mudam as suas características elétricas conforme os materiais saturados de óleo se tornem preenchidos, total ou parcialmente, de vapor ou água quente. As imagens geradas antes do emprego das técnicas de recuperação são comparadas com as imagens geradas posteriormente. Um geotomograma não precisa representar inteiramente um reservatório, para ser útil à monitorização do processo de recuperação do reservatório. Pode-se realizar uma monitorização satisfatória, combinando-se as informações fornecidas pela geotomografia eletromagnética com as informações fornecidas por outros métodos de prospecção geofísica.

A geotomografia eletromagnética é uma técnica valiosa para monitorar os processos de recuperações secundária ou terciária de reservatórios petrolíferos. Tal afirmação é reforçada pelos argumentos seguintes, que foram extraídos integralmente da literatura relevante (Alumbaugh & Morrison, 1995; Deming & Devaney, 1997; Haber & Oldenburg, 1997; Laine, 1987; Lopes & Lopes, 1989; Lopes & Lopes, 1992; Lopes & Lopes, 1994b; Lopes et al., 1997a; Lopes et al., 1998a; Yu & Edwards, 1997).

- 1) A geotomografia eletromagnética permite sondagens de regiões subterrâneas, a partir de poços secos ou inundados.
- 2) Ela pode gerar imagens de partes pequenas ou grandes de reservatórios petrolíferos, dependendo das frequências de operação.
- 3) Ela possui natureza ativa, o que significa que as características dos sinais transmitidos podem ser mudadas facilmente, para otimizar a monitorização.
- 4) Ela fornece resolução mais elevada do que muitos métodos de prospecção geofísica.
- 5) Ela pode incorporar muitas técnicas sofisticadas de rastreamento de raios, que foram desenvolvidas originalmente para a indústria sísmica.

- 6) Ela não envolve ondas elásticas ou microexplosões, que podem danificar as paredes dos furos.
- 7) O nível elevado de ruído sísmico, causado por movimentos de fluidos no reservatório, pode prejudicar bastante o desempenho da geotomografia sísmica, mas não costuma prejudicar o desempenho da geotomografia eletromagnética.
- 8) As simplificações que resultam do emprego de trajetórias retilíneas tendem a afetar o desempenho da geotomografia eletromagnética menos adversamente do que o desempenho da geotomografia sísmica.
- 9) As imagens reconstruídas pela geotomografia eletromagnética geralmente informam mais sobre o estado do reservatório do que as imagens reconstruídas pela tomografia geofísica sísmica.
- 10) A coleta de dados para a geotomografia eletromagnética é normalmente mais rápida do que a coleta de dados para a geotomografia sísmica.
- 11) O emprego da geotomografia eletromagnética para monitorar processos de recuperações secundária ou terciária de um reservatório petrolífero é frequentemente menos dispendioso e menos arriscado do que o emprego da tomografia geofísica sísmica.

Em muitos casos, o aumento da eficiência do processo de recuperação de um reservatório petrolífero justifica plenamente o custo de um programa de monitorização que inclua a tomografia geofísica eletromagnética.

Haber & Oldenburg (1997) empregaram a geotomografia eletromagnética para mapear a distribuição do fator de atenuação em uma região situada entre dois furos, distantes setenta metros entre si. *Adotou-se a aproximação de raios retos.* Os furos interceptaram uma estrutura mineralizada. O objetivo das sondagens era mapear a estrutura a partir dos furos. As

freqüências de operação foram 3,1 MHz e 11,5 MHz. Reconstruíram-se em todas as imagens as partes mais significativas do meio sondado. Haber e Oldenburg concluíram que a incerteza na localização de uma feição reconstruída e a sua significância podem ser avaliadas comparando-se vários geotomogramas da região investigada.

Os dados usados nas simulações computacionais, descritas no Capítulo 6, são gerados através do cálculo de muitas integrais de linha. Os caminhos de integração são definidos pelas trajetórias dos raios no meio simulado. O objetivo da técnica de rastreamento de raios é estabelecer essas trajetórias (Lee & Lai, 1997; Pereyra, 1996). A técnica é capaz de determinar as células que são atravessadas por cada trajetória, bem como os comprimentos dos segmentos definidos pela interseção das trajetórias com as células. Esses cálculos não envolvem aproximações. O algoritmo de reconstrução de imagens proposto utiliza o número de células atravessadas por cada trajetória. Portanto, a técnica de rastreamento de raios é útil não só à resolução do problema direto, mas também à resolução do problema inverso.

A geotomografia eletromagnética possui muitas aplicações, algumas das quais estão brevemente descritas na seção 1.3. O objetivo principal do estudo de aplicações da geotomografia eletromagnética é justificar a utilidade do método de reconstrução de imagens proposto. Embora tal justificativa possa ser efetuada analisando-se aplicações que não sejam geofísicas (Bronnikov & Duifhuis, 1998; Hiriyanaiyah, 1997; Sakellariou et al., 1997; Schweiger & Arridge, 1998; Menendez & Andino, 1998; Williams & Beck, 1995), enfatiza-se, nas simulações, uma aplicação geofísica, que figura entre as que mais exigem dos métodos de reconstrução de imagens. O estudo de aplicações é importante porque ele permite o conhecimento das situações em que a geotomografia eletromagnética é empregada. É através desse estudo que se conhecem as freqüências comumente empregadas em cada aplicação, os

respectivos critérios de resolução, as geometrias típicas, as características dos ruídos encontrados nos dados coletados no campo, e os níveis de potência dos sinais emitidos e recebidos.

Embora a geotomografia apresente muitas qualidades específicas, a melhor maneira de caracterizar uma região subterrânea é correlacionar as evidências fornecidas por diversos métodos de prospecção geofísica. Quando a região é sondada pelos lados direito e esquerdo, as áreas que estão localizadas perto desses lados são cruzadas por poucas trajetórias. Conseqüentemente, as reconstruções dessas áreas tendem a ser mais afetadas por artefatos. Muitos métodos de perfilagem podem facilitar a caracterização dessas áreas, complementando as informações fornecidas pela geotomografia (Bigelow, 1997; Chang et al., 1997; Howard, 1997; Mohaghegh et al., 1996). Até mesmo a interpretação das feições localizadas nas regiões centrais dos geotomogramas, onde a resolução costuma ser maior, pode ser facilitada pela extrapolação das informações, fornecidas pelos métodos de perfilagem, sobre as vizinhanças dos lados direito e esquerdo da região sondada. Em tais vizinhanças, sondas que funcionem por ressonância nuclear magnética podem detectar fraturas em rochas cristalinas (Georgi, 1997; Oraby & Chafai, 1997). Como o valor da permissividade elétrica da água é elevado, em comparação aos das rochas cristalinas, as fraturas podem, em muitos casos, ser associadas às feições dos geotomogramas que apresentam valores elevados de permissividade elétrica. Dessa forma, muitas fraturas podem ser delineadas. Sondagens acústicas, que investiguem as vizinhanças dos acessos à região de interesse, também podem fornecer informações que ajudem a interpretar os geotomogramas, porque fraturas, em formações subterrâneas densas, freqüentemente causam atenuações significativas nas ondas acústicas primárias e secundárias.

Outra maneira que pode facilitar bastante a interpretação dos geotomogramas é a análise de testemunhos geofísicos colhidos na região de interesse (Tantot et al., 1997; Yamamoto et al., 1997). Essa análise pode ser efetuada mediante o emprego de tomógrafos com fontes de raios

X, que são fontes usadas nas tomografias médicas mais convencionais (Cho et al., 1993). Antonellini et al. (1994) reconstruíram imagens da porosidade de testemunhos geofísicos, empregando um tomógrafo disponível comercialmente. Os valores de porosidade obtidos variaram de 3% a 23%. O tomógrafo era sensível a elementos de volume (voxéis) da ordem de dois milímetros cúbicos. Na prospecção petrolífera, a análise de testemunhos colhidos em furos objetiva identificar rochas tipicamente encontradas em reservatórios de petróleo. Por isso, é importante a determinação da porosidade, da permeabilidade, e dos fluidos presentes nos testemunhos geofísicos. A porosidade das rochas comumente encontradas em reservatórios petrolíferos situa-se entre 10% e 30%, embora rochas que apresentem porosidade menor também possam ser achadas em reservatórios de interesse comercial. O produto da porosidade pelo volume do reservatório fornece o volume de fluidos contidos no reservatório. Na maioria dos reservatórios, os hidrocarbonetos preenchem parcialmente os poros das rochas. A água é freqüentemente o único outro fluido presente. O cálculo da saturação aquosa é crucial para determinar se o reservatório é adequado à produção comercial de hidrocarbonetos.

O cálculo da porosidade necessita do conhecimento da densidade média das formações do reservatório. Esses contrastes de densidade podem ser determinados no campo, empregando-se uma sonda gravimétrica nos furos (Prensky, 1994). Ela mede, com bastante exatidão, o componente vertical da aceleração da gravidade. As principais qualidades desta sonda são:

- a) um raio de investigação bem grande, que permite a determinação da densidade média das formações, de maneira mais representativa do que muitos outros tipos de sonda;
- b) baixíssima sensibilidade aos diâmetros dos furos e às alterações que o processo de perfuração causa nas vizinhanças dos furos.

Os métodos existentes de prospecção geofísica têm apresentado melhorias expressivas em seus desempenhos, graças à utilização de novas técnicas de processamento de sinais, aos avanços

na instrumentação, ao melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos e ao emprego de *modelagens matemáticas* mais abrangentes (Chow et al., 1998; Dawson et al., 1997; Demuyneck et al., 1998; Diab, 1998; Gibert et al., 1994; Kruslov & Shepelsky, 1994; Lopes, 1998; Molyneux & Witten, 1994; Vasudevan et al., 1997; Voles, 1997).

Basicamente, os instrumentos envolvidos em sondagens realizadas por meio da geotomografia eletromagnética são os seguintes: antenas, cabos coaxiais, detector de fase, microprocessadores, gerador de sinais, amplificador de potência, gerador síncrono e amplificadores de sinais. Alguns instrumentos adicionais costumam ser empregados em furos (Dyer & Wallroth, 1997; Genter et al., 1997; Prenskey, 1994): inclinômetros, termômetros, periscópios e câmeras de televisão. Hanna (1985) descreve o funcionamento de uma sonda impermeável da *Atlas Copco*, que é capaz de determinar orientações de furos com grande precisão. Ele afirma que a *Eastman International Company* também fabrica instrumentos que informam orientações de furos. Os desenvolvimentos em “hardware” permitem que as profundidades dos instrumentos nos furos sejam estabelecidas com precisão elevada. O emprego de outros métodos de prospecção geofísica, com o fim de obter informações que complementem as da geotomografia eletromagnética, geralmente requer a utilização de instrumentos específicos. A ausência de uma sonda de ressonância nuclear magnética não impede a utilização da geotomografia eletromagnética; mas as informações que tal sonda fornece sobre as rochas de um reservatório petrolífero podem facilitar bastante a interpretação dos geotomogramas.

A Fig. 7.1 apresenta o sistema de aquisição de dados em furos da *Delta Epsilon*. Ele possui uma impressora (localizada no fundo da Fig. 7.1), um guincho (localizado no fundo e ao lado da impressora) e um computador (mostrado em primeiro plano). Todo o sistema é bastante robusto, e pode ser transportado em uma mala compacta. Uma bateria de 12 Vdc é capaz de fazer todo o sistema funcionar. O cabo do guincho apresenta trezentos e cinco metros de

comprimento. O computador serve para controlar o guincho, armazenar os dados, processá-los e apresentar os resultados na tela. Na Fig. 7.2, observa-se o mesmo guincho mostrado na Fig. 7.1, um tripé e uma sonda. Todos os modelos de guincho fabricados pela *Delta Epsilon* envolvem materiais leves e resistentes à corrosão. Os rolamentos são selados e dispensam lubrificação. A Fig. 7.3 mostra um guincho, fabricado pela *Delta Epsilon*, que necessita de uma fonte de 120 Vac e 60 Hz para funcionar. O cabo desse guincho possui mil metros de comprimento, o que permite a realização de sondagens mais profundas do que as que podem ser efetuadas com o modelo mostrado nas Figs. 7.1 e 7.2.

Além de fabricar sistemas de aquisição de dados em furos, a *Delta Epsilon* produz instrumentos capazes de medir a orientação de furos. Um desses instrumentos contém dois sensores. Os três componentes do campo gravitacional são medidos por um desses sensores; o outro sensor mede os três componentes do campo magnético da Terra. Cada conjunto de três medições representa um vetor. As seis coordenadas cartesianas são dados independentes. A determinação da orientação da sonda necessita do cálculo dos valores de cinco incógnitas: as magnitudes de cada vetor, o comprimento de cabo que foi desenrolado, o azimute, e a inclinação. Em sondas convencionais, o dado excedente é descartado; mas a sonda da *Delta Epsilon* o emprega para melhorar estimativas da inclinação e do azimute do furo. A sonda é capaz de detectar a distorção no campo magnético terrestre, causada pelo revestimento interno do furo com material metálico. Os efeitos de tal distorção sobre as medidas podem ser efetivamente compensados, mediante calibração da sonda.

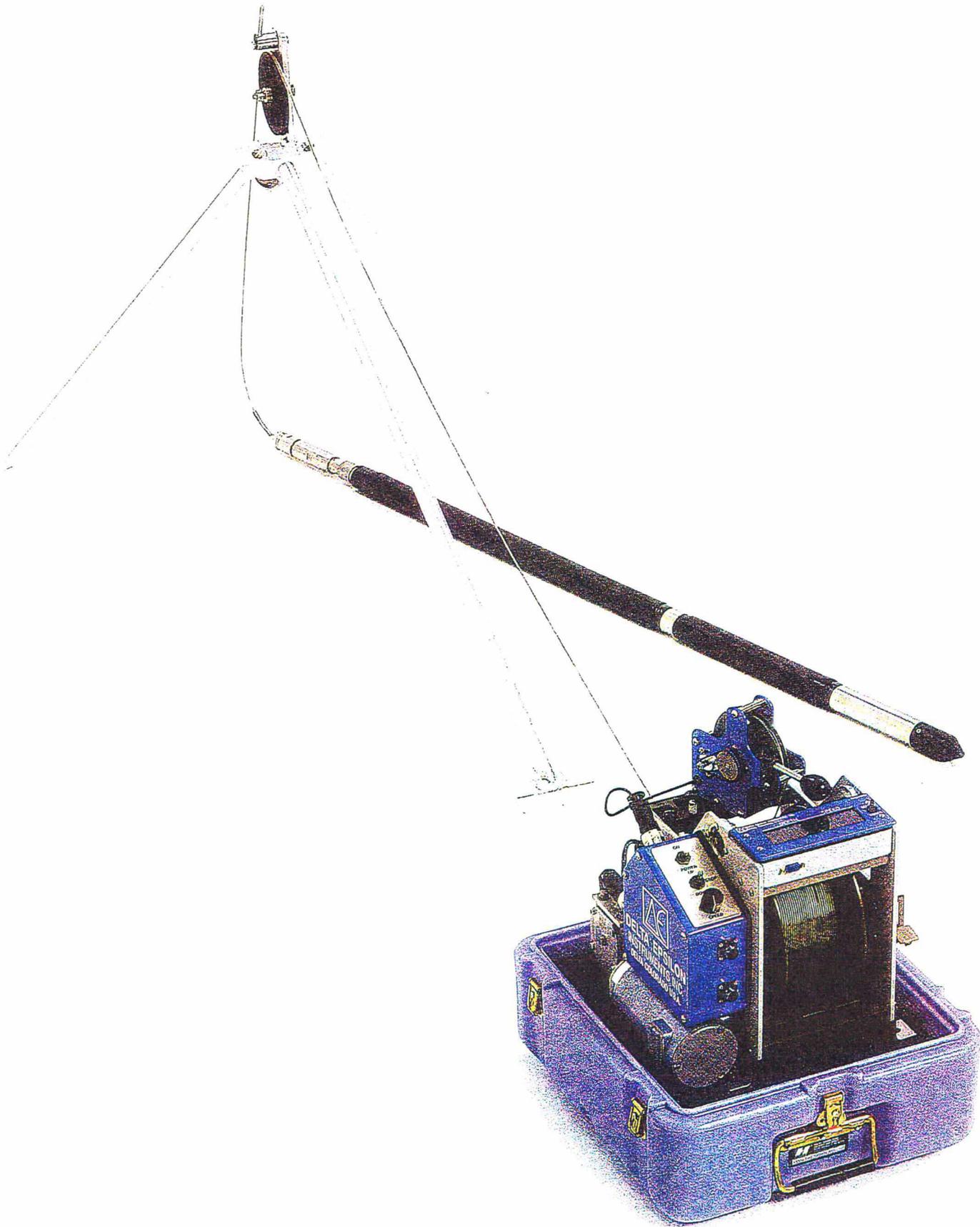


Figura 7.2 - O guincho 300-1E da Delta Epsilon, um tripé e uma sonda.

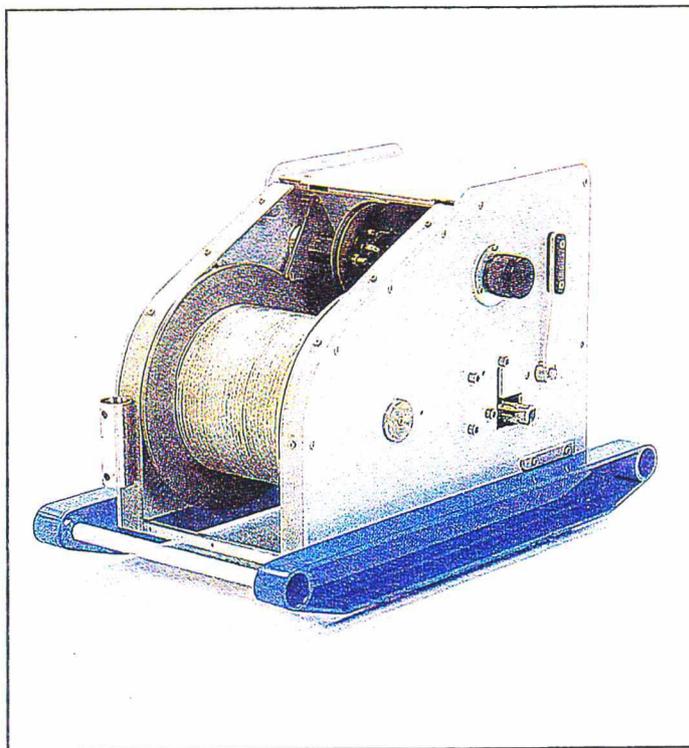


Figura 7.3 - O guincho 1000-1E da Delta Epsilon.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

A reconstrução de imagens é uma importante aplicação da *Transformada Inversa de Radon* (Palamodov, 1995; Panchenko, 1993). Há, basicamente, três tipos de método que permitem calcular essa transformada inversa: *os métodos diretos, os métodos iterativos e os métodos híbridos* (Lopes & Lopes, 1991). Nos métodos diretos, a Transformada Inversa de Radon é calculada realizando-se uma quantidade finita de operações. Exemplos desses métodos são o *Método de Fourier* e o *Método da Retroprojeção Filtrada* (Colak et al., 1997). Nos métodos iterativos, necessita-se teoricamente de um número infinito de repetições de uma seqüência finita de operações, para calcular a Transformada Inversa de Radon. O método de reconstrução de imagens proposto neste trabalho é iterativo. A principal vantagem dos métodos iterativos sobre os métodos diretos é que aqueles métodos são geralmente menos influenciados pela geometria usada para a coleta de dados (Lopes & Lopes, 1992). Tal fato é importante em aplicações geofísicas, porque as geometrias são variadas. O método tomográfico desenvolvido pode também ser empregado para a inspeção não invasiva de peças industriais e para a reconstrução de imagens do interior do corpo humano (Lopes & Lopes, 1991). Os métodos híbridos são os que resultam da mistura dos métodos diretos com os métodos iterativos. A implementação de um método híbrido só é justificada, se o seu desempenho for superior aos desempenhos isolados dos métodos que o compõem. Quando os métodos diretos são implementados, eles geralmente não conseguem fornecer a solução exata; conseqüentemente,

algum processamento adicional precisa ser efetuado, para aumentar a acurácia da solução. Durante cada iteração do algoritmo tomográfico desenvolvido, a amplitude de cada célula da imagem é atualizada independentemente do processo de atualização de amplitudes de outras células. Essa característica favorece a programação concorrente do algoritmo, em máquinas que disponham de arquiteturas sistólicas (Diab, 1998), o que permite um melhor desempenho em tempo real da reconstrução da imagem. Tal desempenho é de primordial importância para a indústria de recuperação de reservatórios petrolíferos.

O Brasil é um importante exportador de mármore. A geotomografia eletromagnética é adequada à inspeção não invasiva de blocos de mármore, permitindo a descoberta de heterogeneidades internas, que possam comprometer a qualidade do material. Exemplos de tais heterogeneidades são: fraturas, vazios e a presença de materiais estranhos.

A natureza simultânea do algoritmo tomográfico proposto, a filtragem seletiva passa-baixas e a generalização da técnica de segmentação de imagens de McKinnon & Bates (1981), originada no contexto da Engenharia Biomédica, para melhorar a qualidade das imagens do coração humano, conferem ao método desenvolvido robustez e estabilidade suficientes para obliterar o comportamento convergente cíclico, que é observado quando certas técnicas tomográficas, como as *Técnicas de Reconstrução Algébrica* (ART), são empregadas para resolver problemas inconsistentes. A principal consequência dessa obliteração é que as inconsistências presentes no conjunto de dados e as inconsistências induzidas pelas limitações do modelo são relativamente pouco transferidas para as imagens reconstruídas. Essa é uma característica muito desejável em algoritmos tomográficos que são aplicados em reconstruções de imagens de meios geofísicos.

O problema inverso bidimensional geofísico é geralmente incompleto, porquanto o espectro de orientações de raios que atravessam o meio geofísico dificilmente perfaz cento e

oitenta graus. Tal fato torna a reconstrução de imagens de meios geofísicos mais complexa do que a reconstrução de imagens do interior do corpo humano. O comportamento assintótico e praticamente acíclico do método tomográfico proposto facilita a determinação da iteração mais adequada para a interrupção do processo de reconstrução. Os métodos diretos são pouco adequados para resolver o problema geotomográfico, porque a presença nos dados de níveis tipicamente elevados de ruído, bem como a grande quantidade de dados e de operações matemáticas envolvidas nesse problema, causa tanta propagação e acumulação de erros, que os geotomogramas ficam seriamente corrompidos por artefatos. Essa corrupção não é normalmente significativa, quando o método de reconstrução de imagens desenvolvido neste trabalho é empregado, devido às seguintes razões: o algoritmo tomográfico apresenta natureza autocorretiva; ele próprio aumenta a relação sinal-ruído efetiva dos dados, através do uso de uma média ponderada para atualizar as amplitudes das células em cada iteração; e o processo de reconstrução incorpora a generalização de uma técnica de redução de artefatos de tomogramas, que consiste em reconstruir isoladamente partes da imagem. A versatilidade do método de reconstrução de imagens proposto favorece a sua implementação em "hardware", o que aumentaria bastante a sua velocidade.

O método proposto é factível. Ele requer somente equipamentos disponíveis comercialmente, tais como: gerador de sinais, amplificador de potência, gerador síncrono, detector de fase, amplificadores de sinais, cabos coaxiais, antenas e microprocessadores (Lopes & Lopes, 1989). Os benefícios gerados pelo emprego da geotomografia, que são comumente mencionados na literatura especializada, tendem a justificar os investimentos na aparelhagem.

Os geotomogramas de condutividade elétrica são geralmente mais sensíveis à atenuação da onda eletromagnética do que ao deslocamento da fase com a frequência. Esse deslocamento influencia mais os geotomogramas de permissividade elétrica. Portanto, a quantidade de

artefatos, em ambos os geotomogramas, é reduzida pela inversão conjunta dos dados associados tanto à variação da fase com a frequência, como à variação da intensidade da onda entre as antenas transmissora e receptora. O método tomográfico aqui desenvolvido permite que os geotomogramas sejam relativamente pouco afetados por degradações que atuem individualmente sobre cada dado. Os geotomogramas contêm as informações dominantes no conjunto de dados. Tais informações geralmente versam sobre as estruturas significativas presentes no meio investigado, e não sobre os ruídos e os efeitos de ordem secundária decorrentes do emprego de simplificações da realidade. A descoberta de que tanto os algoritmos iterativos propostos como o célebre *algoritmo de Dines e Lytle* apresentam desempenhos independentes de imagens homogêneas, que sejam usadas para encetá-los, sugere que outros algoritmos tomográficos preexistentes possam também apresentar tal independência (Lopes et al., 1997a). Propõe-se a investigação dessa possibilidade em pesquisa futura. O algoritmo desenvolvido permite que condicionamentos adicionais sejam facilmente impostos durante o processo de reconstrução, a fim de acelerar a convergência para *soluções plausíveis fisicamente*, apesar de as matrizes de coeficientes dos sistemas lineares envolvidos serem muito esparsas. Os condicionamentos adicionais podem refletir as peculiaridades da geometria, do equipamento empregado e do processo físico envolvido. Entende-se por *condicionamento adicional* qualquer restrição diferente daquelas impostas pelos sinais medidos. Um exemplo de condicionamento adicional é a prescrição de um intervalo de valores plausíveis de fator de atenuação. Se, em alguma iteração, o algoritmo tomográfico atribuir a uma célula uma amplitude que não pertença a esse intervalo, então tal amplitude é modificada, assumindo o valor mais próximo, contido no intervalo.

O conjunto de dados coletados em uma expedição geotomográfica é geralmente ambíguo.

O aumento da quantidade de dados pode ajudar a reduzir as ambigüidades. Esse aumento pode

ser conseguido, empregando-se outras localizações das antenas ou outras frequências. A interpretação dos geotomogramas deve idealmente ser efetuada à luz de evidências fornecidas por outros métodos de prospecção geofísica e de informações obtidas de antemão sobre o meio sondado. Essa interpretação integrada pode ser realizada em aplicações da geotomografia eletromagnética que têm sido intensivamente estudadas, tais como a monitorização dos processos de recuperações secundária ou terciária de reservatórios petrolíferos e a sondagem de repositórios de rejeitos químicos ou nucleares. A reconstrução de imagens de condutividade elétrica e de permissividade elétrica é útil para descobrir características do meio geofísico que poderiam ser erradamente interpretadas como artefatos, se apenas um tipo de imagem fosse reconstruída. A geração de dados sintéticos e a inversão tomográfica deles, empregando-se a mesma geometria do problema real, são úteis para determinar as regiões mais confiáveis dos geotomogramas e a resolução que pode ser esperada. Se a região de interesse for sondada apenas pelos seus lados direito e esquerdo, então se pode esperar que a resolução vertical das imagens reconstruídas seja superior à resolução horizontal.

Entre as diversas contribuições originais apresentadas neste trabalho, há a proposta de uma técnica iterativa de segmentação de imagens. Tal técnica melhora substancialmente o desempenho da geotomografia eletromagnética, conforme atestam as simulações. A técnica de segmentação pode também ser empregada para melhorar os desempenhos de outros tipos de tomografia, tais como: a tomografia sísmica, a tomografia elétrica e a tomografia nuclear (Lopes et al., 1998a). Pretende-se incorporar a nova técnica de segmentação de imagens aos processos de reconstrução efetuados pelas célebres *Técnicas de Reconstrução Algébrica* (ART) e pelas *Técnicas de Reconstrução Iterativa Simultânea* (SIRT). Lopes et al. (1998a) generalizaram o algoritmo de Dines e Lytle, mediante a otimização de seu desempenho em relação ao nível de ruído, e incorporaram no algoritmo generalizado a técnica de segmentação proposta nesta tese.

Essa versão *aditiva* generalizada do algoritmo de Dines e Lytle está apresentada na seção 3.7. O artigo de Lopes et al. (1998a) exemplifica a facilidade com que a técnica de segmentação proposta pode ser incorporada a técnicas de reconstrução de imagens. Essa técnica de segmentação pode beneficiar muitas reconstruções de imagens tridimensionais. As simulações mostraram que, embora a tomografia eletromagnética de segmentação não requeira recursos computacionais sofisticados, ela permite reconstruir bem as distribuições de condutividade elétrica e de permissividade elétrica relativa. Um tema formidável de pesquisas futuras é a incorporação de outros filtros e algoritmos de segmentação em processos de reconstrução de imagens bidimensionais e tridimensionais (Accame & Natale, 1997; Alirezaie et al., 1997; Campbell et al., 1997; Foltz & Welsh, 1998; Franceschetti et al., 1997; Hilton & Ogden, 1997; Koivunen et al., 1997; Lauren & Nandhakumar, 1997; Legault & Suen, 1997; Lindeberg & Li, 1997; Moghaddamzadeh & Bourbakis, 1997; Najand et al., 1998; Ramponi & Moloney, 1997; Tremeau & Borel, 1997; Tsai, 1997; Wu et al., 1998a; Wu et al., 1998b).

O método de avaliação local ou global da resolução digital de imagens reconstruídas fornece resultados que são consistentes com julgamentos visuais. Muitos artefatos são detectados facilmente, mediante a comparação da imagem reconstruída da distribuição de condutividade elétrica com a imagem reconstruída da distribuição de permissividade elétrica relativa. As reconstruções de ambas essas imagens envolvem a reconstrução de uma imagem da distribuição de fator de atenuação. Esta imagem pode ser comparada àquelas, para facilitar a caracterização da região investigada.

Lopes & Lopes (1991) efetuaram reconstruções de imagens tanto de meios geofísicos, quanto de vários objetos. Os objetos não se restringiram a testemunhos geofísicos. Serão publicados futuramente os resultados relativos ao emprego em reconstruções de imagens de certos tipos de redes neurais, bem como de novas técnicas multidimensionais de super-resolução

(Amari & Cichocki, 1998; Gerwe & Plonus, 1998). Os resultados apresentados no Capítulo 6 ilustram basicamente o funcionamento das técnicas propostas neste trabalho. O leitor interessado no emprego de outros métodos de sondagem de meios geofísicos pode consultar as referências citadas (Baum, 1997; Chang et al., 1997; Cherniakov, 1996; Deming & Devaney, 1997; Lopes & Lopes, 1994b; Lopes et al., 1997c; Lopes, 1998; Lopes et al., 1998b; Oraby & Chafai, 1997; Wong et al., 1997). O algoritmo de segmentação de imagens desenvolvido pode, em princípio, ser aplicado a qualquer tipo de tomografia (Lopes et al., 1998a). O método de reconstrução de imagens proposto é simples, versátil e robusto. Ele emprega conceitos bem-fundamentados, para resolver, de maneira singular, um problema que é comum a diversas áreas de conhecimento, tais como: a Radioastronomia, a Medicina Nuclear e Ultra-Sônica, a Química Molecular e o Geoprocessamento.

ANEXO

FORMAS COMPACTAS DAS EXPRESSÕES MATEMÁTICAS ENVOLVIDAS NO FILTRO DE IMAGENS ADAPTATIVO

A notação compacta é bastante utilizada na área de Processamento de Imagens. Essa notação facilita tanto a interpretação quanto a implementação dos procedimentos descritos matematicamente. As equações (3.10)–(3.17) podem ser respectivamente expressas como:

$$D_1 = \frac{\sum_{m=-1}^0 \sum_{n=0}^1 |x_{i+m, j+n} - x_{i, j}| \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})}{\sum_{m=-1}^0 \sum_{n=0}^1 \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})},$$

$$D_2 = \frac{\sum_{m=-1}^0 \sum_{n=-1}^0 |x_{i+m, j+n} - x_{i, j}| \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})}{\sum_{m=-1}^0 \sum_{n=-1}^0 \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})},$$

$$D_3 = \frac{\sum_{m=0}^1 \sum_{n=-1}^0 |x_{i+m, j+n} - x_{i, j}| \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})}{\sum_{m=0}^1 \sum_{n=-1}^0 \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})},$$

$$D_4 = \frac{\sum_{m=0}^1 \sum_{n=0}^1 |x_{i+m, j+n} - x_{i, j}| \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})}{\sum_{m=0}^1 \sum_{n=0}^1 \operatorname{sgn}(x_{i+m, j+n})},$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \sum_{m=-1}^0 \sum_{n=-1}^1 x_{i+m, j+n}}{1 - \sum_{m=-1}^0 \sum_{n=-1}^1 \text{sgn}(x_{i+m, j+n})},$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=0}^1 x_{i+m, j+n}}{1 - \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=0}^1 \text{sgn}(x_{i+m, j+n})},$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^0 x_{i+m, j+n}}{1 - \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^0 \text{sgn}(x_{i+m, j+n})},$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \sum_{m=0}^1 \sum_{n=-1}^1 x_{i+m, j+n}}{1 - \sum_{m=0}^1 \sum_{n=-1}^1 \text{sgn}(x_{i+m, j+n})}.$$

GLOSSÁRIO

Acurácia: grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro do mensurando. Ela é também chamada de *exatidão*. A acurácia não deve ser confundida com a precisão. O número 42,3968127 é uma estimativa de π , que apresenta maior precisão e menor acurácia do que o número 3.

Anisotropia elétrica: qualidade de certos materiais de reagir diferentemente segundo a direção de propagação da onda eletromagnética. A anisotropia elétrica é geralmente significativa em cristais.

Anticlinal: dobra cujos flancos se voltam para baixo e cuja convexidade se volta para cima. Nessa acepção, a palavra *anticlinal* é substantivo feminino, sinônima dos substantivos *anticlínico* ou *anticlino*. A palavra *anticlinal* pode também ser usada como adjetivo: *vale anticlinal*.

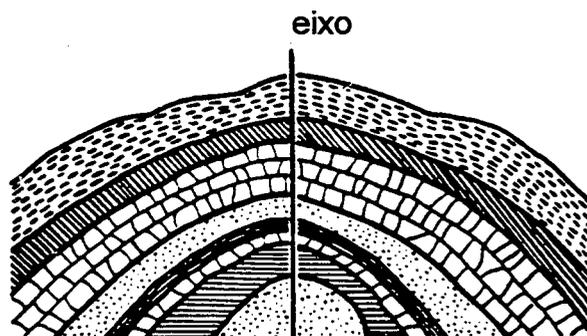


Figura G.1 - Uma anticlinal.

Aqüífero: formação rochosa permeável que armazena água e pode transmiti-la para poços e fontes.

Barita: mineral comum, que ocorre em cristais tabulares; sulfato de bário (Ba SO_4); baritina; espato-pesado.

Clutter: sinais indesejáveis de eco, causados por reflexões de ondas eletromagnéticas em estruturas de pouco interesse para a sondagem. A interface solo-ar costuma ser causadora de *clutter*.

Difração: mudança, que não possa ser explicada como reflexão ou refração, na direção e intensidade de uma onda, após esta passar por um obstáculo ou através de uma abertura.

Dolomita: mineral muito comum, que ocorre em cristais e em massas; carbonato duplo de cálcio e magnésio, $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$; dolomia. A rocha que consiste em grande parte desse mineral é também chamada *dolomita*.

Fantasma: a imagem verdadeira, gerada matematicamente, isenta de artefatos, e usada para a geração de dados sintéticos, os quais, após sofrerem degradações de várias naturezas possíveis, são usados para construir versões do próprio fantasma, mediante o emprego de técnicas de processamento de imagens. Comparações entre o fantasma e suas versões determinam a qualidade e a eficiência dessas técnicas. A principal razão para o emprego de fantasmas, em vez de estruturas reais, é que eles permitem investigar individualmente vários fenômenos que não podem ser separados fisicamente. Por exemplo, nas tomografias que utilizam fontes de raios X, os dados sempre contêm ruídos causados tanto

pelo espalhamento quanto pela estatística dos fótons, mas as simulações efetuadas com fantasmas podem indicar separadamente os efeitos específicos de cada fonte de ruído.

Gabro: rocha magmática, plutônica, em geral preta, constituída essencialmente de plagioclásio cálcico e piroxênio, e que pode conter ainda olivina e magnetita.

Geoestatística: ciência que utiliza conceitos geológicos, correlações de funções, campos randômicos e fractais, para analisar dados dependentes da posição e, em certos casos, do tempo, visando à construção de imagens bidimensionais, tridimensionais ou tetradimensionais de regiões subterrâneas. Uma das principais características da Geoestatística é a capacidade de combinar quantitativamente dados de tipos diferentes. Na indústria de prospecção petrolífera, dados sísmicos, colhidos na superfície do solo ou perto dela, costumam ser combinados com dados coletados em poços. Estes dados são geralmente mais confiáveis do que aqueles. A Geoestatística fornece uma maneira de construir imagens de reservatórios petrolíferos, levando-se em consideração os variados graus de confiança associados aos diferentes tipos de dados. As imagens dos reservatórios são obtidas pela interpolação espacial de informações. A Geoestatística não só permite a construção de um modelo de reservatório que seja consistente com os dados, como também oferece a flexibilidade de modificá-lo dentro de certos limites de incerteza. Métodos geoestatísticos são comumente empregados para gerar imagens da distribuição de porosidades em reservatórios petrolíferos.

Geotomograma: imagem de uma formação subterrânea, obtida pelo emprego de algoritmo tomográfico.

Gnaisse: rocha metamórfica feldspática laminada, nitidamente cristalina, e de composição mineralógica muito variável. O gnaisse geralmente consiste de faixas que diferem em cor e composição. Algumas faixas contêm grande quantidade de feldspato e quartzo, outras faixas são ricas em hornblenda ou mica. A palavra *гнаisse* é substantivo masculino.

Hidrocarboneto: composto constituído apenas por átomos de carbono e hidrogênio. Os hidrocarbonetos benzênicos apresentam fórmula geral $C_n H_{2n-6}$. Os hidrocarbonetos acíclicos saturados são também chamados de *alcanos*, *parafinas*, *hidrocarbonetos formênicos* ou *hidrocarbonetos limites*. Os alcanos apresentam fórmula geral $C_n H_{2n+2}$.

Inteligência Artificial: campo multidisciplinar que abrange a Computação, as Neurociências, a Filosofia, a Psicologia, a Robótica e a Lingüística, cujo objetivo é o desenvolvimento de sistemas aparentemente cognitivos, capazes de armazenar informações, aplicá-las à resolução de problemas e adquirir novas informações.

Lençol freático: depósito de água subterrâneo e natural, formado em profundidade relativamente pequena. O lençol freático é também chamado *lençol superficial* ou *lençol de água*.

Lignita: carvão fóssil, da Era Mesozóica, compacto ou terroso, geralmente marrom-escuro, que corresponde a um estágio intermediário entre a turfa e o carvão betuminoso, que pode conservar a textura dos vegetais dos quais se formou, e conter entre cinquenta e sete por cento e oitenta por cento de carbono. A palavra *linhita* é variante ortográfica de *lignita*.

Mapa de densidades: imagem em que cada célula tem como amplitude o número de raios que a atravessam.

Morena: acumulação de seixos, cascalhos, areia, barro e detritos de rochas, provenientes de transporte realizado pelas geleiras.

Ótica Geométrica: ramo da Física caracterizado pelo emprego de comprimentos de onda relativamente pequenos, permitindo admitir-se que a energia seja transportada ao longo de raios, e que várias leis da Ótica sejam formuladas a partir de considerações de natureza geométrica.

Perfilagem: técnica de investigação geofísica, usada principalmente nas prospecções de petróleo e de água subterrânea. Os perfis de poços geralmente têm como objetivos principais a determinação da profundidade da jazida de hidrocarbonetos ou do aquífero, bem como a estimação de seus volumes. Para realizar uma perfilagem em um poço, vários sensores são acoplados a aparelhos eletrônicos razoavelmente sofisticados. Os sensores são introduzidos nos poços, registrando, em cada profundidade, diversas informações relativas às características físicas das rochas e dos fluidos que possam existir em seus interstícios (poros). Com os sensores elétricos, detecta-se, por exemplo, a resistividade das formações rochosas. A identificação das rochas é facilitada pela comparação dos valores obtidos na perfilagem com os valores das resistividades de rochas conhecidas. Com os sensores nucleares, detecta-se a intensidade de radioatividade das rochas e dos fluidos em seus poros, o que permite inferir a composição mineralógica das formações investigadas. Com os sensores acústicos, ultra-sons são emitidos em uma ponta da sonda, a intervalos regulares de tempo, e detectados na outra ponta. O tempo que o sinal sonoro leva para percorrer essa distância, através da formação rochosa, é medido e gravado. Posteriormente, esses sinais são comparados com os tempos de trânsito associados a rochas

de composições conhecidas, para que se realizem inferências sobre as composições mineralógicas das formações atravessadas pelo poço.

Pixel: menor elemento construtivo de uma imagem digital bidimensional. Usa-se também *pixel*.

O plural de *pixel* é *pixéis*. *Pixel* é palavra oriunda da Língua Inglesa: *[pic]ture [el]ement*.

Poço: termo genérico que designa uma perfuração, seja esta produtiva ou não. Classificam-se os poços em: *poços de exploração*, que visam à pesquisa de campos novos; *poços de estimacão e de confirmação*; *poços de extensão e de delimitação*; *poços de desenvolvimento*; *poços de reinjecão*. Ainda cabe registrar as seguintes denominações: *poço esgotado*; *poço eruptivo*, que produz naturalmente, sem bombeamento; *poço fechado*; *poço de intervenção*, que é normalmente oblíquo e usado em emergências; *poço de obrigacão*, que é perfurado em decorrência de uma cessão de direito de propriedade; e, finalmente, *poço testemunho*, cuja função é recolher elementos característicos sobre a jazida.

Porosidade: característica das rochas e dos solos de apresentar estrutura granular com espaços vazios entre os grãos. A porosidade é expressa como a relação entre o volume de espaços vazios e o volume total da rocha ou do solo.

Precisão: capacidade de distinguir formas de expressar uma medida. A precisão não deve ser confundida com a acurácia. A precisão de uma medida é indicada pelo número de dígitos significativos. A medida 2,434 V é mais precisa do que 2,43 V. Como a precisão não envolve comparações com o valor verdadeiro, medidas de alta precisão não são necessariamente medidas que apresentam acurácia elevada. A acurácia se refere à exatidão

do resultado de uma medição. A precisão se refere à exatidão da operação pela qual o resultado foi obtido.

Produção primária: primeira fase da exploração de um reservatório de petróleo, em que a pressão natural existente na jazida faz o petróleo efluir à superfície, permitindo a extração de até vinte e cinco por cento da reserva total da jazida.

Raio-soma: integral de linha discretizada, calculada ao longo da trajetória que liga o ponto de emissão ao ponto de recepção de um sinal a que se possam associar comprimentos de onda relativamente curtos.

Recuperação secundária: conjunto de processos utilizados para aumentar a taxa de aproveitamento de uma jazida de hidrocarbonetos, que consiste em injetar água, gás, vapor ou outros fluidos no reservatório, através de furos suplementares, permitindo a exploração de até trinta e cinco por cento da reserva total da jazida.

Recuperação terciária: terceira e última fase da extração de hidrocarbonetos de uma jazida, que consiste na introdução de água com aditivos químicos, injeção de hidrocarbonetos misturáveis, aplicação de processos térmicos ou outros processos, permitindo a exploração de até quarenta e cinco por cento da reserva total da jazida.

Redes neurais: sistemas computacionais distribuídos, baseados no funcionamento das redes de neurônios biológicos, capazes de aprender a adaptar-se ao ambiente, e de responder inteligentemente a certas excitações. As redes neurais artificiais mais conhecidas são as *redes diretas* com duas camadas de neurônios. O algoritmo mais famoso para o

treinamento dessas redes é o *algoritmo de retropropagação*. Usam-se também as formas *redes neuronais* e *redes de neurônios*, embora com menos frequência do que *redes neurais*.

Região de suporte: a base de uma imagem. Por exemplo, a região de suporte de uma imagem em que cada amplitude I é função das coordenadas espaciais i e j , $I = f(i, j) = f_{ij}$, é estabelecida pelo conjunto de valores de i e de j que satisfazem a condição $f_{ij} = 0$.

Resolução: a menor variação em uma quantidade, que pode ser medida com certeza. A resolução expressa o grau com que valores quase idênticos de uma quantidade podem ser discriminados. Em uma imagem, a resolução espacial expressa a capacidade de representar as feições menores.

Segmentação de imagens: divisão de uma imagem em suas regiões constitutivas ou em classes, geralmente para extrair ou exaltar determinadas feições.

Voxel: menor elemento construtivo de uma imagem digital tridimensional. O plural de *voxel* é *voxéis*. *Voxel* é palavra oriunda da Língua Inglesa: *[vo]lume [el]ement*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCAME, M.; NATALE, F.G. Edge Detection by Point Classification of Canny Filtered Images. **Signal Processing**, The Netherlands, p. 11–22, July 1997.
- ALEXANDER, M.J.; SALTER, M.J. The Design of Dipole and Monopole Antennas with Low Uncertainties. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, U.S.A., v. 46, n. 2, p. 539–543, Apr. 1997.
- ALIREZAIE, J.; JERNIGAN, M.E.; NAHMIAS, C. Neural Network-Based Segmentation of Magnetic Resonance Images of the Brain. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, U.S.A., v. 44, n. 2, p. 194–198, Apr. 1997.
- ALUMBAUGH, D.L.; MORRISON, H.F. Monitoring Subsurface Changes over Time with Cross-Well Electromagnetic Tomography. **Geophysical Prospecting**, Great Britain, v. 43, n. 7, p. 873–902, Oct. 1995.
- ALUMBAUGH, D.L.; NEWMAN, G.A. Three-Dimensional Massively Parallel Electromagnetic Inversion. Part II. Analysis of a Crosswell Electromagnetic Experiment. **Geophysical Journal International**, Great Britain, v. 128, n. 2, p. 355–363, Feb. 1997.
- AMARI, S.; CICHOCKI, A. Adaptive Blind Signal Processing - Neural Network Approaches. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n. 10, p. 2026–2048, Oct. 1998.
- ANTONELLINI, M.; AYDIN, A.; POLLARD, D.D.; DONFRO, P. Petrophysical Study of Faults in Sandstone Using Petrographic Image Analysis and X-Ray Computerized Tomography. **Pure and Applied Geophysics**, Switzerland, v. 143, ns. 1/2/3, p. 181–201, 1994.
- ARCONE, S.A.; YANKIELUN, N.E.; CHACHO, E.F. Reflection Profiling of Artic Lake Ice Using Microwave FM-CW Radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 35, n. 2, p. 436–443, Mar. 1997.
- ATKINSON, P.M.; TATNALL, A.R. Neural Networks in Remote Sensing. **International Journal of Remote Sensing**, Great Britain, v. 18, n. 4, p. 699–709, Mar. 1997.

- BARRICK, D.E. Grazing Behavior of Scatter and Propagation Above Any Rough Surface. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, U.S.A., v. 46, n. 1, p. 73–83, Jan. 1998.
- BAUM, C.E. Discrimination of Buried Targets Via the Singularity Expansion. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 13, n. 3, p. 557–570, June 1997.
- BIGELOW, E.L. The Benefits of Integrating Different Information Disciplines. **Report 38382 of the Society of Petroleum Engineers**, U.S.A., 1997.
- BOIS, P.; LaPORTE, M.; LAVERGNE, M.; THOMAS, G. Essai de Determination Automatique des Vitesses Sismiques par Mesures entre Puits. **Geophysical Prospecting**, Great Britain, v. 19, p. 43–83, 1971.
- BORN, M.; WOLF, E. **Principles of Optics**. Oxford: Pergamon, 1993.
- BRONNIKOV, A.V.; DUIFHUIS, G. Wavelet-Based Image Enhancement in X-Ray Imaging and Tomography. **Applied Optics**, U.S.A., v. 37, n. 20, p. 4437–4448, July 1998.
- BURRELL, G.A.; PETERS, L. Pulse Propagation in Lossy Media Using the Low-Frequency Window for Video Pulse Radar Application. **Proceedings of the IEEE**, U.S.A., v. 67, n. 7, p. 981–990, July 1979.
- CALDECOTT, R.; POIRIER, M.; SCOFEA, D.; SVOBODA, D.E.; TERZUOLI, A.J. Underground Mapping of Utility Lines Using Impulse Radar. **IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing**, Great Britain, v. 135, n. 4, p. 343–353, Aug. 1988.
- CAMPBELL, N.W.; THOMAS, B.T.; TROSCIANKO, T. Automatic Segmentation and Classification of Outdoor Images Using Neural Networks. **International Journal of Neural Systems**, Great Britain, v. 8, n. 1, p. 137–144, Feb. 1997.
- CHAN, T.; KUGA, Y.; ISHIMARU, A. Subsurface Detection of a Buried Object Using Angular Correlation Function Measurement. **Waves in Random Media**, Great Britain, v. 7, n. 3, p. 457–465, July 1997.
- CHANG, H.; CHEN, H.; FANG, J. Lithology Determination from Well Logs with Fuzzy Associative Memory Neural Network. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 35, n. 3, p. 773–780, May 1997.
- CHERNIAKOV, M. Optimal Step Frequency Signal for a Ground Penetrating Radar. **Electronics Letters**, Great Britain, v. 32, n. 1, p. 62–64, Jan. 1996.
- CHO, Z.H.; JONES, J.P.; SINGH, M. **Foundations of Medical Imaging**. New York: Wiley, 1993.

- CHOW, Y.L.; HOJJAT, N.; NAEINI, S.; DANA, R. Spectral Green's Functions for Multilayer Media in a Convenient Computational Form. **IEE Proceedings on Microwave, Antennas and Propagation**, Great Britain, v. 145, n. 1, p. 85–91, Feb. 1998.
- COLAK, S.B.; PAPAIOANNOU, D.G.; HOOFT, G.W.; MARK, M.B.; SCHOMBERG, H.; PAASSCHENS, J.C.; MELISSEN, J.B.; ASTEN, N.A. Tomographic Image Reconstruction from Optical Projections in Light-Diffusing Media. **Applied Optics**, U.S.A., v. 36, n. 1, p. 180–213, Jan. 1997.
- CÔTE, P.; DEGAUQUE, P.; LAGABRIELLE, R.; LEVENT, N. Detection of Underground Cavities with Monofrequency Electromagnetic Tomography between Boreholes in the Frequency Range 100 MHz to 1 GHz. **Geophysical Prospecting**, Great Britain, v. 43, n. 8, p. 1083–1107, Nov. 1995.
- DAILY, W. Underground Oil-Shale Retort Monitoring Using Geotomography. **Geophysics**, U.S.A., v. 49, n. 10, p. 1701–1707, Oct. 1984.
- DAWSON, M.S.; FUNG, A.K.; MANRY, M. T. A Robust Statistical-Based Estimator for Soil Moisture Retrieval from Radar Measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 35, n. 1, p. 57–67, Jan. 1997.
- DEADRICK, F.J.; RAMIREZ, A.L.; LYTLE, R.J. In Situ Fracture Mapping Using Geotomography and Brine Tracers. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, U.S.A., v. 29, p. 236–238, 1982.
- DEMETER, G. Tomography Using Neural Networks. **Review of Scientific Instruments**, U.S.A., v. 68, n. 3, p. 1438–1443, Mar. 1997.
- DEMING, R.W.; DEVANEY, A.J. Diffraction Tomography for Multi-Monostatic Ground Penetrating Radar Imaging. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 13, n. 1, p. 29–45, Feb. 1997.
- DEMUYNCK, F.J.; VANDENBOSCH, G.A.; CAPELLE, A.R. The Expansion Wave Concept - Part I: Efficient Calculation of Spatial Green's Functions in a Stratified Dielectric Medium. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, U.S.A., v. 46, n. 3, p. 397–406, Mar. 1998.
- DIAB, M. Systolic Decoder for Burst Error-Correcting Codes. **IEE Proceedings on Communications**, Great Britain, v. 145, n. 3, p. 126–132, June 1998.
- DINES, K.A.; LYTLE, R.J. Computerized Geophysical Tomography. **Proceedings of the IEEE**, U.S.A., v. 67, n. 7, p. 1065–1073, July 1979.
- DOGARU, T.; CARIN, L. Time-Domain Sensing of Targets Buried under a Rough Air-Ground Interface. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, U.S.A., v. 46, n. 3, p. 360–372, Mar. 1998.

- DORREN, H.J.; SNIEDER, R.K. Error Propagation in Non-Linear Delay-Time Tomography. **Geophysical Journal International**, Great Britain, v. 128, n. 3, p. 632–638, Mar. 1997.
- DYER, B.C.; WALLROTH, T. Crosshole Seismic Imaging of a Fractured Reservoir. **First Break**, U.S.A., v. 15, n. 5, p. 147–157, May 1997.
- ELLIS, G.A.; PEDEN, I.C. Cross-Borehole Sensing: Identification and Localization of Underground Tunnels in the Presence of a Horizontal Stratification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 35, n. 3, p. 756–761, May 1997.
- EYRAUD, L.; GRANGE, G.; OHANESSIAN, H. **Théorie et Technique des Antennes**. Paris: Vuilbert, 1973.
- FOLTZ, T.M.; WELSH, B.M. Image Reconstruction Using Symmetric Convolution and Discrete Trigonometric Transforms. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 11, p. 2827–2839, Nov. 1998.
- FRANCESCHETTI, G.; IODICE, A.; TESAURO, M. From Image Processing to Feature Processing. **Signal Processing**, The Netherlands, v. 60, n. 1, p. 51–63, July 1997.
- GARN, H.; BUCHMAYR, M.; MÜLLNER, W.; RASINGER, J. Primary Standards for Antenna Factor Calibration in the Frequency Range of (30 to 1000) MHz. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, U.S.A., v. 46, n. 2, p. 544–548, Apr. 1997.
- GENTER, A.; CASTAING, C.; MARTIN, P. Évaluation de la Fracturation des Réservoirs par Forages: Comparaison entre les Données de Carottes et d'Imagerie de Paroi. **Revue de l'Institut Français du Pétrole**, France, v. 52, n. 1, p. 45–60, jan./fév. 1997.
- GEORGI, D.T. Formation Evaluation with Nuclear Magnetic Resonance - World Wide Applications. In: **FIFTH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY (1997: São Paulo) Proceedings...** São Paulo: Brazilian Geophysical Society, 1997. p. 335–337.
- GERKENS, J.C. **Foundation of Exploration Geophysics**. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- GERWE, D.R.; PLONUS, M.A. Superresolved Image Reconstruction of Images Taken through the Turbulent Atmosphere. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 10, p. 2620–2628, Oct. 1998.
- GIBERT, D.; TOURNERIE, B.; VIRIEUX, J. High-Resolution Electromagnetic Imaging of the Conductive Earth Interior. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 10, n. 2, p. 341–351, Apr. 1994.
- HABER, E.; OLDENBURG, D. Joint Inversion: a Structural Approach. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 13, n. 1, p. 63–77, Feb. 1997.
- HANNA, T.H. **Field Instrumentation in Geotechnical Engineering**. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech., 1985.

- HARA, Y.; ATKINS, R.G.; YUEH, S.H.; SHIN, R.T.; KONG, J.A. Application of Neural Networks to Radar Image Classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 32, n. 1, p. 100–109, Jan. 1994.
- HAYKIN, S. Neural Networks Expand SP's Horizons. **IEEE Signal Processing Magazine**, U.S.A., v. 13, n. 2, p. 24–49, Mar. 1996.
- HILTON, M.L.; OGDEN, R.T. Data Analytic Wavelet Threshold Selection in 2-D Signal Denoising. **IEEE Transactions on Signal Processing**, U.S.A., v. 45, n. 2, p. 496–500, Feb. 1997.
- HIRIYANNAIAH, H.P. X-Ray Computed Tomography. **IEEE Signal Processing Magazine**, U.S.A., v. 14, n. 2, p. 42–59, Mar. 1997.
- HOWARD, A.Q. Comparison of Loop and Magnetic Dipole Antenna Models for MWD Resistivity Tool Responses. In: FIFTH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY (1997: São Paulo). **Proceedings...** São Paulo: Brazilian Geophysical Society, 1997. p. 351–352.
- IVANSSON, S. Remark on an Earlier Proposed Iterative Tomographic Algorithm. **Journal of the Royal Astronomical Society**, Great Britain, v. 75, n. 3, p. 855–860, Dec. 1983.
- JESCH, R.M.; McLAUGHLIN, R.H. Dielectric Measurements of Oil Shale as Functions of Temperature and Frequency. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 22, n. 2, p. 99–105, Mar. 1984.
- JONES, H.V.; DULLER, A.W.; CHANTRELL, R.W.; HOARE, A.; BISSEL, P.R. A Neural Network Approach to the Determination of Anisotropy Distributions. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Great Britain, v. 31, p. 3028–3035, 1998.
- KHRUSLOV, E.Y.; SHEPELSKY, D.G. Inverse Scattering Method in Electromagnetic Sounding Theory. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 10, n. 1, p. 1–37, Feb. 1994.
- KING, R.W.; SANDLER, S.S. The Electromagnetic Field of a Vertical Electric Dipole over the Earth or Sea. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, U.S.A., v. 42, n. 3, p. 382–389, Mar. 1994.
- KNIGHT, R.J.; NUR, A. The Dielectric Constant of Sandstones, 60 kHz to 4 MHz. **Geophysics**, U.S.A., v. 52, n. 5, p. 644–654, May 1987.
- KOIVUNEN, V.; HIMAYAT, N.; KASSAM, S.A. Nonlinear Filtering Techniques for Multivariate Images – Design and Robustness Characterization. **Signal Processing**, The Netherlands, v. 57, n. 1, p. 81–91, Feb. 1997.

- LADAS, K.T.; DEVANEY, A.J. Iterative Methods in Geophysical Diffraction Tomography. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 8, n. 1, p. 119–132, Feb. 1992.
- LAINE, E.F. Remote Monitoring of the Steam-Flood Enhanced Oil Recovery Process. **Geophysics**, U.S.A., v. 52, n. 11, p. 1457–1465, Nov. 1987.
- LAINE, E.F.; LYTLE, R.J.; OKADA, J.T. Cross-Borehole Observation of Soil Grouting. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, U.S.A., v. 106, n. 8, p. 871–875, Aug. 1980.
- LaPORTE, M.; LAKSHMANAM, J.; LAVERGNE, M.; WILLM, C. Measures Sismiques par Transmission - Application au Genie Civil. **Geophysical Prospecting**, Great Britain, v. 21, n. 1, p. 146–158, Mar. 1973.
- LAUREN, P.D.; NANDHAKUMAR, N. Estimating the Viewing Parameters of Random, Noisy Projections of Asymmetric Objects for Tomographic Reconstruction. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, U.S.A., v. 19, n. 5, p. 417–430, May 1997.
- LEE, J.W.; LAI, A.K. Hybrid Neural Network / Ray Tracing Model for Radiowave Penetration into Buildings. **Electronics Letters**, Great Britain, v. 33, n. 19, p. 1609–1610, Sept. 1997.
- LEGAULT, R.; SUEN, C.Y. Optimal Local Weighted Averaging Methods in Contour Smoothing. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, U.S.A., v. 19, n. 8, p. 801–817, Aug. 1997.
- LI, L.; YEO, T.; KOOL, P.; LEONG, M. Radio Wave Propagation along Mixed Paths Through a Four-Layered Model of Rain Forest: an Analytic Approach. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, U.S.A., v. 46, n. 7, p. 1098–1111, July 1998.
- LINDBERG, T.; LI, M. Segmentation and Classification of Edges Using Minimum Description Length Approximation and Complementary Junction Cues. **Computer Vision and Image Understanding**, U.S.A., v. 67, n. 1, p. 88–98, July 1997.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira. Tomografia Geofísica Eletromagnética. In: SÉTIMO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (1989: Florianópolis). **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Telecomunicações, Universidade Federal de Santa Catarina & Universidade Estadual de Campinas, 1989. p. 539–545.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira. Reconstrução de Imagens a partir de Dados Ruidosos e Incompletos. In: NONO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (1991: São Paulo). **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Telecomunicações & Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991. p. 20.3.1–20.3.8.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira. Electromagnetic Geophysical Tomography. **IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing**, Great Britain, v. 139, n. 1, p. 27–35, Feb. 1992.

- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira. Um Novo Algoritmo Paralelo para a Reconstrução de Imagens de Meios Geofísicos. In: DÉCIMO PRIMEIRO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (1993: Natal). *Anais...* Natal: Sociedade Brasileira de Telecomunicações & Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1993. p. 165–170.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira. Electromagnetic Geotomography. *Brazilian Journal of Geophysics*, Brazil, v. 12, n. 2, p. 163–175, Dec. 1994a.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira. A Signal Processing Algorithm for Determining the Frequencies of Electromagnetic Remote Sensing Methods. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SYMPOSIUM (1994b: Rio de Janeiro). *Proceedings...* Rio de Janeiro: Brazilian Telecommunications Society & Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1994b. p. 118–122.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira; BARRETO, J.M.; BARRETO, L.M. Multiplicative Version of the Dines and Lytle Algorithm. *Electronics Letters*, Great Britain, v. 33, n. 9, p. 763–765, Apr. 1997a.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira; BARRETO, L.M.; BARRETO, J.M. A New Selective Filter for Improving the Performance of Geotomographic Algorithms. In: FIFTH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY (1997b: São Paulo). *Proceedings...* São Paulo: Brazilian Geophysical Society, 1997b. p. 547–550.
- LOPES, Elizeu Pereira; LOPES, Eliezer Pereira; BARRETO, J.M.; BARRETO, L.M. Wave-Tilt Neural Georadar. In: THIRD BRAZILIAN CONGRESS ON NEURAL NETWORKS (1997c: Florianópolis). *Proceedings...* Florianópolis: L. Calôba and J. Barreto, 1997c. p. 425–431.
- LOPES, Elizeu Pereira; LOPES, Eliezer Pereira; BARRETO, L.M.; BARRETO, J.M. Neural Georadar Probing of Stratified Media. In: FIFTH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY (1997d: São Paulo). *Proceedings...* São Paulo: Brazilian Geophysical Society, 1997d. p. 511–514.
- LOPES, Elizeu Pereira. *Sondagem de Meios Estratificados com o Radar de Subsuperfície Neural*. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - GPEB, Universidade Federal de Santa Catarina.
- LOPES, Eliezer Pereira; LOPES, Elizeu Pereira; BARRETO, J.M.; BARRETO, L.M. Segmentation Tomography. *Electronics Letters*, Great Britain, v. 34, n. 23, p. 2222–2224, Nov. 1998a.
- LOPES, Elizeu Pereira; LOPES, Eliezer Pereira; BARRETO, J.M.; BARRETO, L.M. Robust Nonlinear Inversion of Wave-Tilt Data. *Inverse Problems*, Great Britain, v. 14, n. 4, p. 955–977, Aug. 1998b.

- LYSNE, P.C. A Model for the High-Frequency Electrical Response of Wet Rocks. **Geophysics**, U.S.A., v. 48, n. 6, p. 775–783, June 1983.
- MATSON, C.L. Resolution, Linear Filtering, and Positivity. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 1, p. 33–41, Jan. 1998.
- McKINNON, G.C.; BATES, R.H. Towards Imaging the Beating Heart Usefully with a Conventional CT Scanner. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, U.S.A., v. 28, n. 2, p. 123–127, Feb. 1981.
- McMECHAN, G.A.; GAYNOR, G.C.; SZERBIAK, R.B. Use of Ground-Penetrating Radar for 3-D Sedimentological Characterization of Clastic Reservoir Analogs. **Geophysics**, U.S.A., v. 62, n. 3, p. 786–796, May/June 1997.
- MENENDEZ, R.G.; ANDINO, S.L. A Critical Analysis of Linear Inverse Solutions to the Neuroelectromagnetic Inverse Problem. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 45, n. 4, p. 440–448, Apr. 1998.
- MOGHADDAMZADEH, A.; BOURBAKIS, N. A Fuzzy Region Growing Approach for Segmentation of Color Images. **Pattern Recognition**, Great Britain, v. 30, n. 6, p. 867–881, June 1997.
- MOHAGHEGH, S.; AREFI, R.; AMERI, S.; AMINIAND, K.; NUTTER, R. Petroleum Reservoir Characterization with the Aid of Artificial Neural Networks. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Great Britain, v. 16, n. 4, p. 263–274, 1996.
- MOLYNEAUX, J.E.; WITTEN, A. Impedance Tomography: Imaging Algorithms for Geophysical Applications. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 10, n. 3, p. 655–667, June 1994.
- MURAI, H.; OMATU, S. Remote Sensing Image Analysis Using a Neural Network and Knowledge-Based Processing. **International Journal of Remote Sensing**, Great Britain, v. 18, n. 4, p. 811–828, Mar. 1997.
- MURPHY, W.F.; AUZERAIS, F.M.; LÜLING, M.G.; ANDERSON, B.I.; TOMANIC, J.; BONNER, S.D.; SAKURAI, S.; WOLCOTT, D.S. Interpretation of Heavy Mineralogy Formation, North Slope of Alaska, Using Logging-While-Drilling 2 MHz Resistivity Laboratory Measurements, Modeling and Wireline Comparisons. **Report 24677 of the Society of Petroleum Engineers**, U.S.A., 1992.
- NAJAND, S.; BLOUGH, D.; HEALEY, G. Signal-to-Noise Ratio of the Intensity-Dependent Spread Filter and its Reconstruction. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 5, p. 1059–1067, May 1998.
- NEMETH, T.; NORMARK, E.; QIN, F. Dynamic Smoothing in Crosswell Traveltime Tomography. **Geophysics**, U.S.A., v. 62, n. 1, p. 168–176, Jan./Feb. 1997.
- NEWMAN, G.A.; ALUMBAUGH, D.L. Three-Dimensional Massively Parallel Electromagnetic Inversion. Part I. Theory. **Geophysical Journal International**, Great Britain, v. 128, n. 2, p. 345–354, Feb. 1997.

- OLSSON, O.; FALK, L.; FORSLUND, O.; LUNDMARK, L.; SANDBERG, E. Borehole Radar Applied to the Characterization of Hydraulically Conductive Fracture Zones in Crystalline Rock. **Geophysical Prospecting**, Great Britain, v. 40, p. 109–142, 1992.
- OLSSON, O.; GALE, J.E. Site Assessment and Characterization for High-Level Nuclear Waste Disposal: Results from the Stripa Project, Sweden. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, Great Britain, v. 28, n. 1, p. S 17–S 30, Feb. 1995.
- ORABY, M.; CHAFAI, N. A Case Study of NMR Interpretation in Complex Reservoirs Using Variable T2 Cutoff. In: FIFTH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY (1997: São Paulo). **Proceedings...** São Paulo: Brazilian Geophysical Society, 1997. p. 339–343.
- OSWALD, G.K. Geophysical Radar Design. **IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing**, Great Britain, v. 135, n. 4, p. 371–379, Aug. 1988.
- PALAMODOV, V.P. Localization of Harmonic Decomposition of the Radon Transform. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 11, n. 5, p. 1025–1030, Oct. 1995.
- PAN, X. Unified Reconstruction Theory for Diffraction Tomography, with Consideration of Noise Control. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 9, p. 2312–2326, Sept. 1998.
- PANCHENKO, A.Ñ. Inverse Source Problem of Radiation Transfer: a Special Case of the Attenuated Radon Transform. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 9, n. 2, p. 321–337, Apr. 1993.
- PEREYRA, V. Modeling, Ray Tracing, and Block Nonlinear Travel-Time Inversion in 3D. **Pure and Applied Geophysics**, Switzerland, v. 148, ns. 3/4, p. 345–385, Dec. 1996.
- PETERS, L.; DANIELS, J.J.; YOUNG, J.D. Ground Penetrating Radar as a Subsurface Environmental Sensing Tool. **Proceedings of the IEEE**, U.S.A., v. 82, n. 12, p. 1802–1822, Dec. 1994.
- PORCELLO, L.J.; JORDAN, R.L.; ZELENKA, J.S.; ADAMS, G.F.; PHILLIPS, R.J.; BROWN, W.E.; WARD, S.H.; JACKSON, P.L. The Apollo Lunar Sounder Radar System. **Proceedings of the IEEE**, U.S.A., v. 62, n. 6, p. 769–783, June 1974.
- PRENSKY, S.E. A Survey of Recent Developments and Emerging Technology in Well Logging and Rock Characterization. **The Log Analyst**, U.S.A., v. 35, n. 2, p. 15–45, Mar./Apr. 1994.
- QUEK, B.C.; WONG, B.R.; LOW, K.S. Generalized Eikonal Approximation. Propagation of an Electromagnetic Pulse in a Linear Dispersive Medium. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 10, p. 2720–2724, Oct. 1998.
- RAHN, P.H. **Engineering Geology - An Environmental Approach**. New York: Elsevier, 1986.

- RAMIREZ, A.L. Recent Experiments Using Geophysical Tomography in Fractured Granite. **Proceedings of the IEEE**, U.S.A., v. 74, n. 2, p. 347–352, Feb. 1986.
- RAMIREZ, A.; DAILY, W.; LABRECQUE, D.; OWEN, E.; CHESNUT, D. Monitoring an Underground Steam Injection Process Using Electrical Resistance Tomography. **Water Resources Research**, U.S.A., v. 29, n. 1, p. 73–87, Jan. 1993.
- RAMPONI, G.; MOLONEY, C. Smoothing Speckled Images Using an Adaptive Rational Operator. **IEEE Signal Processing Letters**, U.S.A., v. 4, n. 3, p. 68–71, Mar. 1997.
- RANGAYYAN, R.M.; CIUC, M.; FAGHIH, F. Adaptive-Neighborhood Filtering of Images Corrupted by Signal-Dependent Noise. **Applied Optics**, U.S.A., v. 37, n. 20, p. 4477–4487, July 1998.
- RHEBERGEN, J.B.; BERG, P.M.; HABASHY, T.M. Iterative Reconstruction of Images from Incomplete Spectral Data. **Inverse Problems**, Great Britain, v. 13, n. 3, p. 829–842, June 1997.
- RICHARDSON, C.; AARHOLT, E.; HAMRAN, S.; HOLMLUND, P.; ISAKSSON, E. Spatial Distribution of Snow in Western Dronning Maud Land, East Antarctica, Mapped by a Ground-Based Snow Radar. **Journal of Geophysical Research**, U.S.A., v. 102, n. B9, p. 20343–20353, Sept. 1997.
- ROBERTS, R.L.; DANIELS, J.J. Modeling Near-Field GPR in Three Dimensions Using the FDTD Method. **Geophysics**, U.S.A., v. 62, n. 4, p. 1114–1126, July/Aug. 1997.
- SADIKU, M.N. **Elements of Electromagnetics**. Fort Worth: Saunders, 1994.
- SAKELLARIOU, A.; CHOLEWA, M.; SAINT, A.; LEGGE, G.J. An Accurate Reconstruction Algorithm for Tomography Experiments that Involve Complex Probe-Sample Interactions. **Measurement Science and Technology**, Great Britain, v. 8, n. 7, p. 746–758, July 1997.
- SANDBERG, E.V.; OLSSON, O.L.; FALK, L.R. Combined Interpretation of Fracture Zones in Crystalline Rock Using Single-Hole, Crosshole Tomography and Directional Borehole-Radar Data. **The Log Analyst**, U.S.A., v. 32, n. 2, p. 108–119, Mar./Apr. 1991.
- SATO, T.; TAKEDA, K.; NAGAMATSU, T.; WAKAYAMA, T.; KIMURA, I.; SHINBO, T. Automatic Signal Processing of Front Monitor Radar for Tunneling Machines. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 35, n. 2, p. 354–359, Mar. 1997.
- SCHWEIGER, M.; ARRIDGE, S.R. Comparison of Two- and Three-Dimensional Reconstruction Methods in Optical Tomography. **Applied Optics**, U.S.A., v. 37, n. 31, p. 7419–7428, Nov. 1998.
- SHAVIT R.; ROSEN, E. Lateral Wave Contribution to the Radiation from a Dielectric Half Medium. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, U.S.A., v. 43, n. 7, p. 751–755, July 1995.

- SKÖBERG, H.; NOHARET, B. Distortion-Invariant Filter for Nonoverlapping Noise. **Applied Optics**, U.S.A., v. 37, n. 29, p. 6922–6930, Oct. 1998.
- SKOLNIK, M.; HEMENWAY, D.; HANSEN, J.P. Radar Detection of Gas Seepage Associated with Oil and Gas Deposits. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 30, n. 3, p. 630–633, May 1992.
- SOMERSTEIN, S.F.; BERG, M.; CHANG, D.; CHUNG, H.; JOHNSON, H.; RICHARDSON, B.; PIZZICARA, J.; SALISBURY, W.W. Radio-Frequency Geotomography for Remotely Probing the Interiors of Operating Mini- and Commercial-sized Oil-Shale Retorts. **Geophysics**, U.S.A., v. 49, n. 8, p. 1288–1300, Aug. 1984.
- TANG, C.H.; BOAK, T.I.; GROSSI, M.D. Bistatic Radar Measurements of Electrical Properties of the Martian Surface. **Journal of Geophysical Research**, U.S.A., v. 82, n. 28, p. 4305–4315, Sept. 1977.
- TANTOT, O.; MOULIN, M.; GUILLOIN, P. Measurement of Complex Permittivity and Permeability and Thickness of Multilayered Medium by an Open-Ended Waveguide Method. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, U.S.A., v. 46, n. 2, p. 519–522, Apr. 1997.
- TARANTOLO, P.J.; UNTERBERGER, R.R. Radar Detection of Boreholes in Advance of Mining. **Geophysical Prospecting**, Great Britain, v. 26, p. 359–382, 1978.
- TREMEAU, A.; BOREL, N. A Region Growing and Merging Algorithm to Color Segmentation. **Pattern Recognition**, Great Britain, v. 30, n. 7, p. 1191–1203, July 1997.
- TSAI, D. Boundary-Based Corner Detection Using Neural Networks. **Pattern Recognition**, Great Britain, v. 30, n. 1, p. 85–97, Jan. 1997.
- TURNER, G.; SIGGINS, A.F. Constant Q Attenuation of Subsurface Radar Pulses. **Geophysics**, U.S.A., v. 59, n. 8, p. 1192–1200, Aug. 1994.
- VASUDEVAN, K.; TOZSER, P.; COOK, F.A. Delineation of Surfaces by Skeletonization: Application to Interpretation of 3D Seismic Reflection and Georadar Data Volumes. **Geophysical Research Letters**, U.S.A., v. 24, n. 7, p. 767–770, Apr. 1997.
- VAUHKONEN, M.; KARJALAINEN, P.A.; KAIPIO, J.P. A Kalman Filter Approach to Track Fast Impedance Changes in Electrical Impedance Tomography. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 45, n. 4, p. 486–493, Apr. 1998.
- VITEBSKIY, S.; CARIN, L.; RESSLER, M.A.; LE, F.H. Ultra-Wideband, Short-Pulse Ground-Penetrating Radar: Simulation and Measurement. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 35, n. 3, p. 762–772, May 1997.

- VOLES, R. Plan Resolution of a Subsurface-Penetrating Synthetic Aperture Radar. **Electronics Letters**, Great Britain, v. 33, n. 25, p. 2159–2160, Dec. 1997.
- WENSINK, W.A. Dielectric Properties of Wet Soils in the Frequency Range 1–3000 MHz. **Geophysical Prospecting**, Great Britain, v. 41, n. 6, p. 671–696, Aug. 1993.
- WILLIAMS, R.A.; BECK, M.S. (Eds.). **Process Tomography: Principles, Techniques and Applications**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.
- WILT, M.J.; ALUMBAUGH, D.L.; MORRISON, H.F.; BECKER, A.; LEE, K.H.; DESZCZ-PAN, M. Crosswell Electromagnetic Tomography: System Design Considerations and Field Results. **Geophysics**, U.S.A., v. 60, n. 3, p. 871–875, May/June 1995.
- WILT, M.; SCHENKEL, C.; DALEY, T.; PETERSON, J.; MAJER, E.; MURER, A.S.; JOHNSTON, R.M.; KLONSKY, L. Mapping Steam and Water Flow in Petroleum Reservoirs. **Report 37532 of the Society of Petroleum Engineers**, U.S.A., 1997.
- WITTEN, A.J.; MOLYNEUX, J.E.; NYQUIST, J.E. Ground Penetrating Radar Tomography: Algorithms and Case Studies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, U.S.A., v. 32, n. 2, p. 461–467, Mar. 1994.
- WONG, P.M.; TAMHANE, D.; WANG, L. A Neural-Network Approach to Knowledge-Based Well Interpolation: A Case Study of a Fluvial Sandstone. **Journal of Petroleum Geology**, U.S.A., v. 20, n. 3, p. 363–372, July 1997.
- WU, H.; GIL, J.; BARBA, J. Optimal Segmentation of Cell Images. **IEE Proceedings on Vision, Image and Signal Processing**, Great Britain, v. 145, n. 1, p. 50–56, Feb. 1998a.
- WU, H.; BARBA, J.; GIL, J. A Parametric Fitting Algorithm for Segmentation of Cell Images. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, U.S.A., v. 45, n. 3, p. 400–407, Mar. 1998b.
- XU, T.; McMECHAN, G.A. GPR Attenuation and Its Numerical Simulation in 2.5 Dimensions. **Geophysics**, U.S.A., v. 62, n. 1, p. 403–414, Mar./Apr. 1997.
- YAMAMOTO, J.; SATOH, T.; ISHII, H.; OKATSU, K. An Analysis of CO₂ WAG Coreflood by Use of X-Ray CT. **Report 38068 of the Society of Petroleum Engineers**, U.S.A., 1997.
- YANG, A. Integrated Reservoir Description from Seismic, Well Log, to Production Data. **Report 38381 of the Society of Petroleum Engineers**, U.S.A., 1997.

- YAP, S.C.; QUEK, B.C.; LOW, K.S. Generalized Eikonal Approximation. Propagation of Stationary Electromagnetic Waves in Linear and Nonlinear Media. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 10, p. 2725–2729, Oct. 1998.
- YONEBAYASHI, H.; ONO, K.; ENOMOTO, H.; CHIDA, T.; FUJIWARA, K. Microbial Enhanced Oil Recovery Field Pilot in a Waterflooded Reservoir. **Report 38070 of the Society of Petroleum Engineers**, U.S.A., 1997.
- YU, X.; LOH, N.K.; MILLER, W.C. New Recursive Algorithm for Solving Linear Algebraic Equations. **Electronics Letters**, Great Britain, v. 28, n. 22, p. 2069–2071, Oct. 1992.
- YU, L.; EDWARDS, R.N. On Crosswell Diffusive Time-Domain Electromagnetic Tomography. **Geophysical Journal International**, Great Britain, v. 130, n. 2, p. 449–459, Aug. 1997.
- ZENG, X.; McMECHAN, G.A. GPR Characterization of Buried Tanks and Pipes. **Geophysics**, U.S.A., v. 62, n. 3, p. 797–806, May / June 1997.
- ZHU, W.; WANG, Y.; ZHANG, J. Total Least-Squares Reconstruction with Wavelets for Optical Tomography. **Journal of the Optical Society of America A**, U.S.A., v. 15, n. 10, p. 2639–2649, Oct. 1998.

ÍNDICE REMISSIVO

Este índice versa sobre os Capítulos 1 a 8 e sobre o Anexo. Ele não inclui, portanto, palavras existentes no Resumo e Glossário.

- absorção 38
- acurácia 123
- algoritmo analítico 2
- amplificador de potência 124
- amplificador de sinal 124
- análise espectral 30, 73
- ângulo crítico 61, 66, 67, 72
- ângulo de Brewster 64
- ângulo de incidência 62, 64, 67, 71
- anisotropia 39
- anticlinal 84
- Aproximação de Born 3
- Aproximação de Rytov 3
- aquífero 6
- arquitetura sistólica 123
- artefato 32, 47, 51, 52, 82, 103, 105–107, 115, 124, 125,
- atenuação 124
- azimute 118
- bloco 45–47, 50
- cabo coaxial 124
- caminho direto 62, 63, 65, 71, 75
- campo Jay 84
- campo Richmond 6
- carga de computação 59
- clutter 80
- cobertura angular 6
- coeficiente de reflexão 63, 64, 66, 67, 72
- Colorado 13
- condutividade elétrica 1, 7, 14, 21, 22, 26, 27, 29, 31, 49, 51, 56, 68, 70, 79, 87, 91–105, 107, 109, 124, 126, 127
- coração 32, 53, 123
- corrente de condução 90
- corrente de deslocamento 90
- critério de disparo 103
- DeBeque 13
- Delta Epsilon 117–121
- densidade de raios 52, 82, 107
- deslocamento de fase 124
- detector de fase 124
- diagrama de radiação 69
- difração 2, 4, 34, 49
- distância euclidiana 105
- Eastman International Company 117
- Engenharia Biomédica 123
- Engenharia Civil 12
- Equações de Maxwell 15
- erro 2, 9, 124
- espalhamento 38
- espectro angular 39
- estratificação 8
- fase 24, 27, 34, 66, 76, 105, 125
- fator de atenuação 22, 23, 25, 36, 56, 68, 70, 113, 125, 127
- fator de fase 22, 24, 36
- fator de propagação 15, 28
- fibra ótica 13, 14
- filtragem 46, 47, 49, 56, 103
- filtragem seletiva 123
- filtro 43, 47
- filtro 48–51, 92–94
- filtro adaptativo 19, 47, 91, 98–102, 105–108
- filtro bidimensional 32, 50, 51
- filtro de imagens 129
- fóssil 13
- fratura 12, 115, 123
- frequência de corte 47
- função sinal 37
- função-máscara 56
- furo 61–63, 73, 76–78, 83–86, 113, 116, 118, 119
- gás 111
- Geoestatística 83
- Geoprocessamento 128

- geotomografia sísmica 10, 113
gerador de sinais 124
gerador síncrono 124
Guerra do Vietnã 80
guincho 117, 120
hardware 124
hidrocarboneto 116
Ilhas Canárias 79
incidência rasante 67
índice de refração 28, 34
índice de resolução 103, 106
indústria 112
instrumentação 117
integral de linha 36, 114
Inteligência Artificial 83
interface 60–62, 66, 68, 69, 71, 73–75, 80, 82, 89
interferência 49
interpretação 79, 86, 105, 117, 129
inversão 42, 46, 85, 104, 105
inversão conjunta 125
inversão tridimensional 6
Ivansson 58
janela 43, 44, 47, 48, 103, 107, 110
Lei de Biot e Savart 17
lençol freático 81
limiar de disparo 47
linha de transmissão 14
lixo nuclear 10
lixo químico 12
mapa de densidades 52
Medicina Nuclear 128
Medicina Ultra-Sônica 128
método analítico 79
Método da Retroprojeção Filtrada 122
Método de Fourier 122
Método de Kaczmarz 58
Método de Neumann 9
Método de Papoulis-Gerchberg 9
método dinâmico 76
método direto 122, 124
Método dos Gradientes Conjugados 5, 6
método híbrido 122
microexplosão 113
microprocessador 124
modo transversal magnético 62
NASA 77
nomograma 74
onda direta 60
onda lateral 60, 61, 66, 68, 69
onda primária 115
onda refletida 60, 71, 90
onda refratada 90
onda secundária 115
onda terrestre 60
Ótica Geométrica 21, 28, 36
Parque Nacional de Yosemite 13
perfilagem 5
perfuração 52, 80, 83
permeabilidade 14, 22
permissividade elétrica 1, 11, 14, 21, 22, 25, 27, 29, 31, 56, 63, 68, 70, 71, 79, 87, 91–105, 107, 109, 111, 115, 124, 126, 127
petróleo 5, 68, 84, 116
plano de incidência 62
poço 6, 7, 9, 10, 83, 84, 111, 112
polimento 43
porosidade 116
positividade 43
potência 2, 13, 69, 115
precisão 117
problema direto 6, 114
problema inverso 5, 6, 32, 39, 42, 43, 91, 104, 114, 123
processamento computacional 46
processamento de imagens 18, 20, 58, 129
processamento de sinais 18, 20, 116
profundidade de penetração 64, 71, 73, 89
programação concorrente 123
Projeto Stripa 11
pulso 30
Química Molecular 128
Radioastronomia 128
raio-soma 36, 37, 39, 53
realidade virtual 19
reconstrução bidimensional 33
reconstrução tridimensional 33
rede neural 5
reflexão 29, 30, 34, 68, 73
refração 4, 29, 34, 39, 49, 68
região de Fraunhofer 18, 28, 62
região de suporte 52, 54, 55
relação sinal-ruído 2, 9, 13, 38, 103, 124
relaxação 30
reservatório petrolífero 6
resolução 1, 6, 10, 19, 32, 41, 51, 52, 78, 79, 81, 82, 85–88, 103, 106, 115, 126
ressonância nuclear magnética 115, 117
ruído 1, 9, 41, 49, 59, 91, 106, 107, 111, 113, 124–126,
segmentação de imagens 56, 91, 95, 96, 97–102, 106, 108, 126, 128
sensibilidade 116
sensibilidade 41, 42
sensoriamento remoto 1, 12, 13, 29, 30, 80
Signal Hill 84
sonda gravimétrica 116
subjanela 44–46, 48, 50
super-resolução 127
Técnica da Decomposição do Valor Singular 7
Técnicas de Reconstrução Algébrica 58, 123, 126
Técnicas de Reconstrução Iterativa Simultânea 7, 126
tempo real 6, 123
Tenerife 79

Teoria de Perturbações de Segunda Ordem 9
Teoria do Espalhamento 3
Terrascan 81
testemunho 115, 116, 127
Texaco 10
tomografia de difração 79
tomografia de segmentação 20, 56
tomografia sísmica 126
Transformada de Fourier 29, 47
Transformada de Radon 122
variável de pesagem 38, 59, 91, 105, 106, 110
velocidade da luz 22
vetor de Poynting 66
voxel 33
zona invadida 83