

# SONDAGENS AUDIOMAGNETOTELÚRICAS NAS PROXIMIDADES DAS MINAS DO CAMAQUÃ (RS)

A. L. Padilha, Í. Vitorello  
N. B. Trivedi, J. M. da Costa  
M. J. Ribeiro e J. M. Gross

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 12201-970, São José dos Campos, SP, Brasil

Companhia Brasileira do Cobre - CBC, Avenida João Pessoa, 155  
90040, Porto Alegre, RS, Brasil

Sondagens audiomagnetotelúricas foram efetuadas em duas áreas próximas das Minas do Camaquã (RS) com dois objetivos distintos: na área de Rodeio Velho procurou-se obter evidências corroborativas às interpretações geológicas a partir de dados geomagnéticos e gravimétricos anteriores; na região de Santa Maria, sondagens comparativas seriam realizadas entre áreas mineralizadas e não-mineralizadas em sulfetos. Em Rodeio Velho, as sondagens confirmam a presença de centenas de metros de sedimentos, provavelmente afetados por estruturas verticais e alternância de camadas resistiva e condutora. Na região de Santa Maria, as sondagens nas áreas mineralizadas apresentaram uma camada intermediária mais condutora, que aproximadamente coincide com a posição da camada mineralizada.

**AUDIOMAGNETOTELLURIC SOUNDINGS NEAR THE CAMAQUÃ MINES (RS)** *Audiomagnetotelluric soundings were carried out in the region near the Camaquã Mines (State of Rio Grande do Sul) with two distinct objectives: in the area of Rodeio Velho corroborative evidences were sought for geological interpretation based on previous geomagnetic and gravity data; in Santa Maria, comparative soundings were planned between mineralized and nonmineralized areas. In Rodeio Velho, the soundings confirm sediment thicknesses of hundreds of meters, probably affected by vertical structures, and the presence of alternating intercalated resistive and conductive layers. In the area of Santa Maria, the soundings in the mineralized areas present a more conducting intermediary layer which is approximately coincident with the position of the mineralized layer.*

## INTRODUÇÃO

A utilização de diferentes métodos geofísicos na prospecção mineral está diretamente relacionada ao tipo de depósito a ser estudado. Assim, o método mais adequado para prospectar depósitos de sulfetos disseminados é o de Polarização Induzida (IP), enquanto outros métodos eletromagnéticos (Turam, Slingram, TDEM, etc.) são mais apropriados no caso de sulfetos maciços. Pela sua potencialidade em discriminar camadas condutoras próximas à superfície, o método audiomagnetotélúrico (AMT) vem sendo utilizado com sucesso na prospecção de depósitos maciços (ver, por exemplo, Strangway and Koziar, 1979; Lakanen, 1986). Neste trabalho é analisada a possibilidade do emprego desse método em problemas específicos de sulfetos disseminados, tais como no caso em que sua concentração se correlacione com algum parâmetro que possa ser mapeado por levantamentos AMT (por exemplo, o limite entre duas camadas geológicas com propriedades elétricas bastante distintas). Em tal situação, o método AMT pode oferecer uma interessante complementaridade ao método IP, tanto pela sua facilidade em sondar maiores profundidades como pela simplicidade de operação no campo e o baixo custo da aquisição e processamento dos dados.

Para verificar a viabilidade dessa utilização do método, foram idealizados levantamentos AMT em duas regiões próximas às Minas do Carnaçuã (Fig. 1). Vinte e uma sondagens foram efetuadas no período de 13 a 16 de fevereiro de 1990, nas regiões de Rodeio Velho (15 sondagens) e Santa Maria (6 sondagens), localizadas respectivamente a 10 e 5 km de distância das minas. Na região de Santa Maria, devido ao detalhado conhecimento geológico da subsuperfície, as sondagens foram realizadas em pontos onde existem furos de perfuração para: comparar os resultados magnetotélúricos em áreas mineralizadas em sulfetos e áreas não-mineralizadas; correlacionar os dados geológicos com os das sondagens e avaliar a possibi-

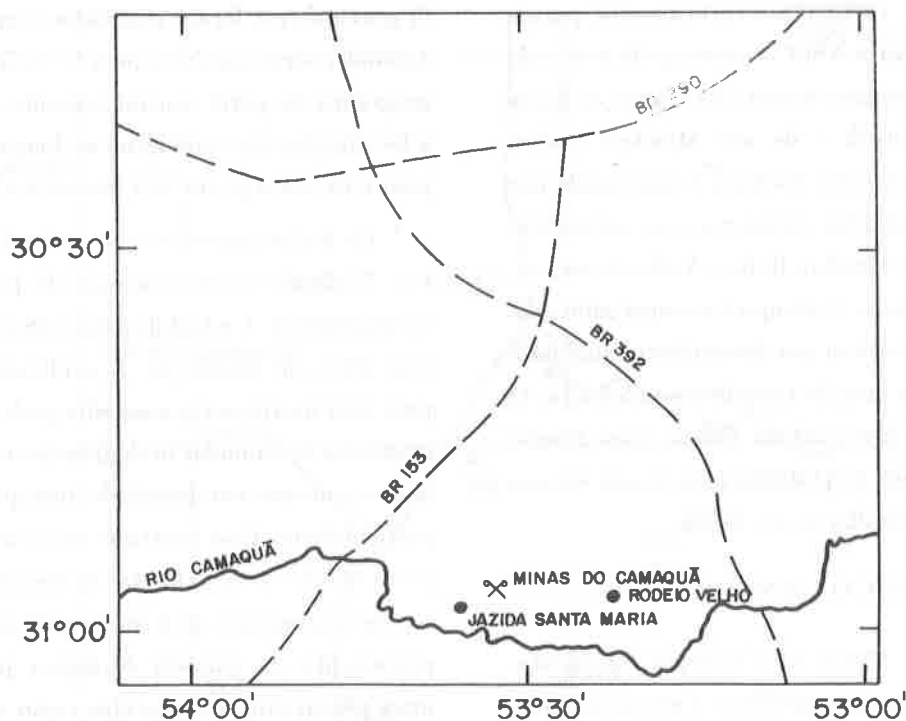
lidade de detectar camadas condutoras abaixo da camada mineralizada conhecida. Na região de Rodeio Velho, o levantamento AMT teve por objetivo encontrar evidências de possíveis estruturas geoeletricas que pudessem ser interpretadas conjuntamente com anomalias geomagnéticas e gravimétricas observadas em trabalhos anteriores.

A localização geográfica das sondagens AMT, na região de Rodeio Velho, é indicada na Fig. 2. As sondagens AMT na região de Santa Maria foram realizadas em locais onde a Companhia Brasileira do Cobre (CBC) efetuou furos de perfuração, conforme mostra a Tab. 1.

## GEOLOGIA LOCAL

Na área de Santa Maria, as rochas próximas à superfície pertencem ao Membro Vargas, que se encontra sobreposto ao Membro Mangueirão, pertencentes ambos à Formação Arroio dos Nobres do Grupo Bom Jardim. O Membro Vargas é constituído por conglomerados, arenitos médios e, às vezes, intercalações de andesitos de pequena expressão. Os furos na área de trabalho mostram, na porção superior, conglomerados desse Membro, com algumas dezenas de metros de espessura, que se sobrepõem a arenitos médios e finos. Nessa interface ocorrem os sulfetos disseminados que podem ter sido afetados por processos de remobilização, associados a falhamentos que predominantemente apresentam orientação NW. O Membro Mangueirão, constituído por sedimentos mais finos (arenitos e siltitos), é encontrado a algumas centenas de metros abaixo da superfície. As camadas apresentam mergulhos de 2° a 3° para NW. Os furos em geral alcançam um pouco mais de 100 m de profundidade, sendo que alguns penetram até 200 m (Teixeira et al., 1978).

O conhecimento geológico da área de Rodeio Velho é bem menor e, para este trabalho, as informações foram extraídas da carta geológica da Folha Passo do Cação (Departamento Nacional da



**Figura 1.** Localização das áreas onde foram realizadas as sondagens AMT, nas proximidades das Minas do Camaquã, Caçapava do Sul (RS).

*AMT sounding areas near the Camaquã Mines in Caçapava do Sul (RS).*

**Tabela 1.** Informações sobre os furos de perfuração onde foram realizadas sondagens AMT, em Santa Maria.

*Information (elevation and depths of the conglomerate layer and mineralized zones) on boreholes where AMT soundings were carried out.*

IDENTIFICAÇÃO DO FURO	IDENTIFICAÇÃO DA SONDAAGEM	COTA (m)	PROF. CONGLO/ARENITO (m)	PROF. ZONA COM SULFETOS *
PCA3-89-03	SM1	295,2	100	92 - ? (mineralizada)
PCA3-90-04	SM2	290	?	? (mineralizada)
PCA3-87-05	SM3	293,4	74	75 - ? (mineralizada)
PCA3-89-04	SM4	293,6	90	73 - 150 (mineralizada)
PCA6-82-01	SM5	289,0	95	120 - ?
PCA3-81-11G	SM6	323	54	-

\* Zona na qual é observada a presença de pirita, galena, calcopirita, bornita etc.

Produção Mineral, 1970). Essa carta mostra, para a área dos levantamentos AMT, a presença de rochas do Grupo Camaquã, especificamente da Formação Santa Bárbara indiferenciada e de seu Membro Rodeio Velho. A Formação Santa Bárbara é constituída por conglomerados e arenitos grosseiros com estratificação cruzada e o seu Membro Rodeio Velho corresponde a rochas andesíticas. O Grupo Camaquã sobrepõe-se ao Grupo Bom Jardim por discordância angular e a sua espessura, na área de trabalho, é indefinida. O mapa geológico indica também falhas, com direção NW, cortando a área de trabalho pelo menos em sua porção leste (ver Padilha et al., 1992).

### DADOS GEOFÍSICOS ANTERIORES

A região das Minas do Camaquã foi sujeita, em 1973, ao Projeto Aerogeofísico Camaquã (Jackson, 1973), que consistiu de levantamentos de espectrometria gama e de aeromagnetometria (Intensidade Magnética Total), com direção de vôo N45W.

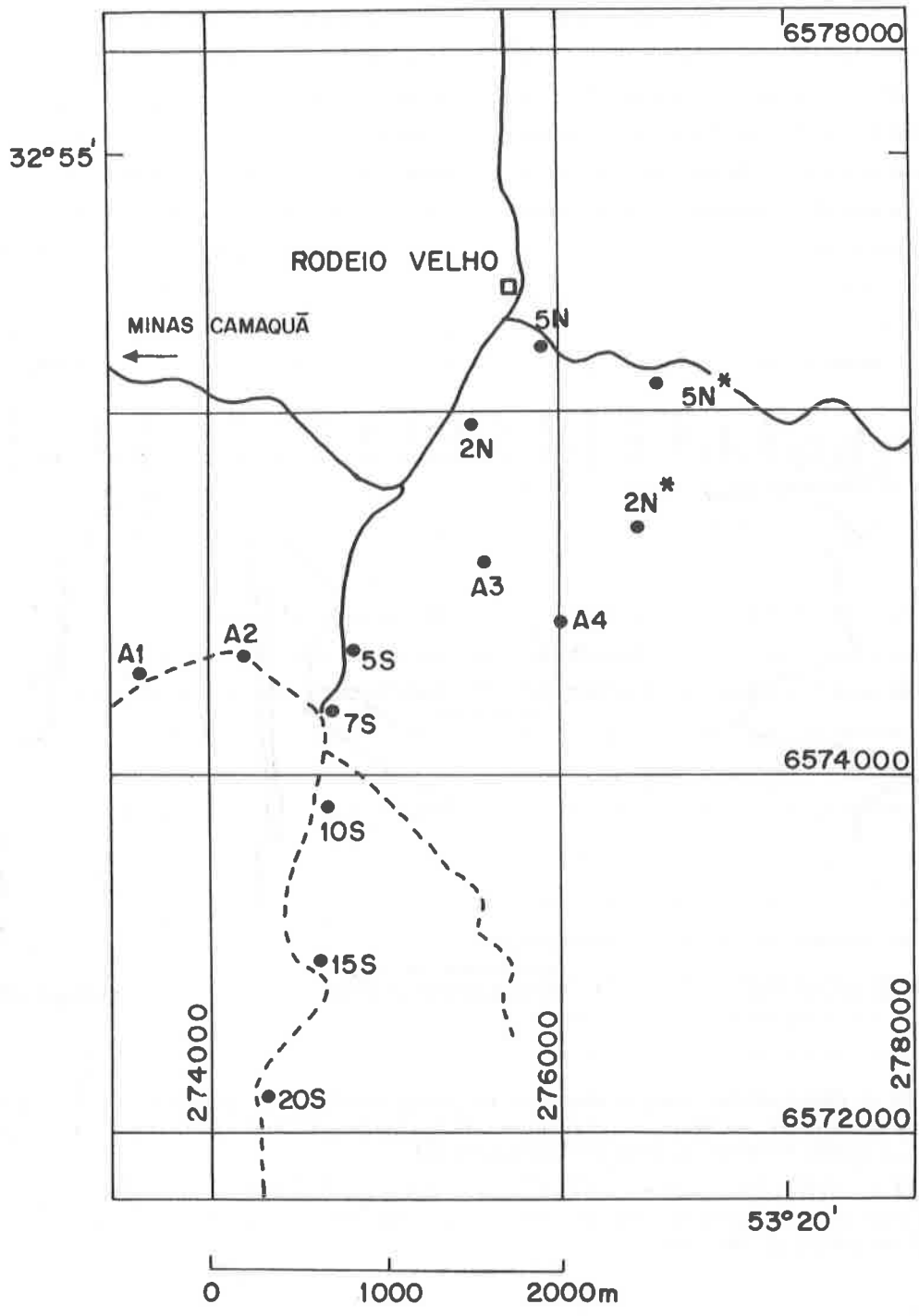
Na área de Santa Maria, o Mapa de Potássio, Folha Passo do Cação desse Projeto, mostra uma anomalia disposta aproximadamente na direção N20E. Em 1981, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT/SP) realizou levantamentos de polarização induzida (IP), com arranjo dipolo-dipolo, polo-dipolo e direcional (mise-à-la-masse). Esse estudo mostra que, nessa área, não ocorrem contrastes significativos de resistividade aparente, concluindo que esse fato reflete a homogeneidade litológica. Quando muito, as pequenas variações locais de resistividade associam-se às variações de permeabilidade, porosidade e natureza do cimento (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981).

Na área de Rodeio Velho, o Mapa de Intensidade Magnética Total do Projeto Camaquã mostra uma anomalia aeromagnética alongada na direção aproximada de N70W, tendo 8 km de extensão por 2 km de largura. Três perfis magnetométricos e um per-

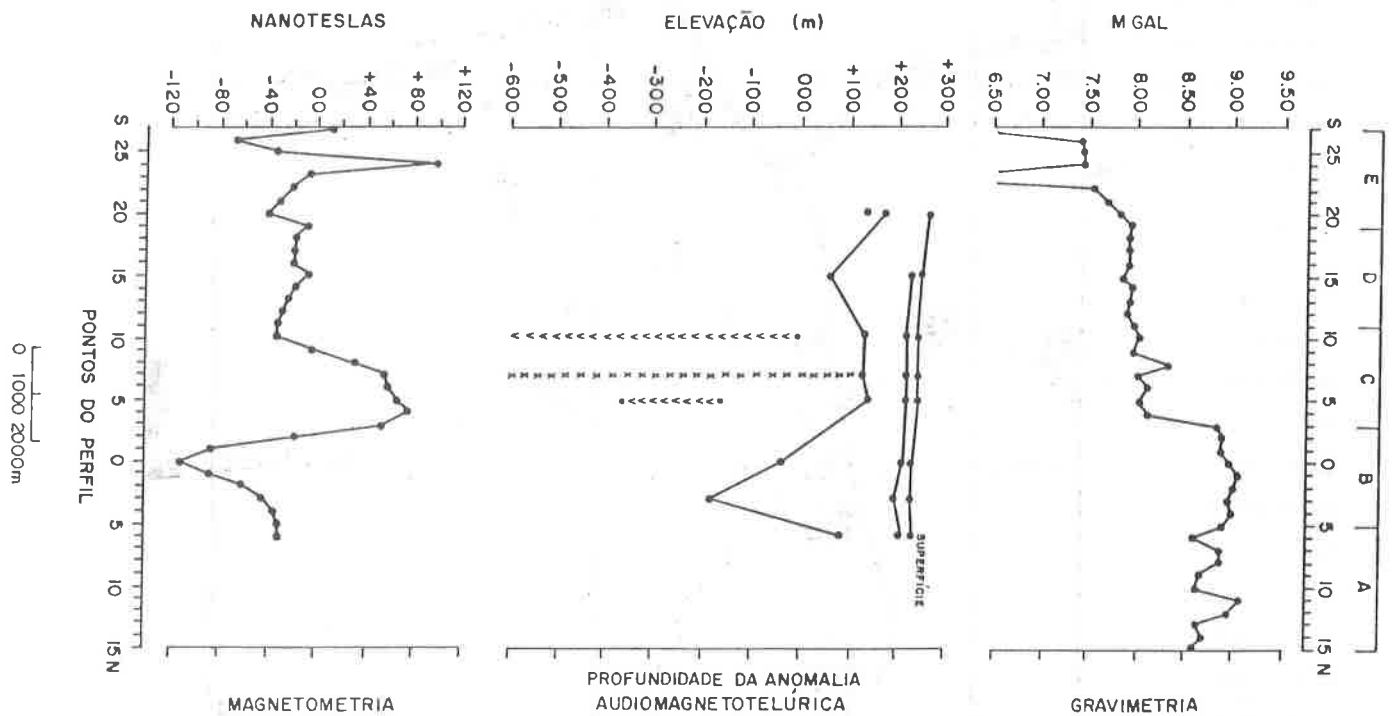
fil gravimétrico foram realizados transversalmente à anomalia aeromagnética pelo IPT/SP. A localização geográfica do perfil central coincide, em parte, com a localização das sondagens ao longo da estrada, do ponto 5N até o ponto 20S mostrados na Fig. 2.

Os dados gravimétricos corrigidos mostram, na Fig. 3, uma pequena variação de patamar com rebaixamento de 1 mGal do ponto 3S para o ponto 4S, com 200 m de separação. A explicação mais simples para essa inexpressiva anomalia pode ser atribuída à existência de camadas litológicas horizontais, com pequeno contraste em densidade, justapostas na mesma profundidade. Esse contraste em densidade pode ser resultado de variação lateral da densidade da camada sedimentar, efeitos de hidrotermalismo, intrusão, espessamento da camada litológica para norte, ou, mais provavelmente, movimentação vertical das camadas ao longo de um plano de falha subvertical. A anomalia magnética observada (Fig. 3) é muito mais substancial que a gravimétrica, visto apresentar variações de dezenas de nanoteslas, sendo a amplitude da anomalia (pico a pico) de 200 nT. Em princípio, as mesmas condições descritas anteriormente são pertinentes como causas da anomalia, porém o contraste advém de possíveis variações de susceptibilidade magnética em lugar da variação de densidade.

Existe, entretanto, uma incompatibilidade de interpretações entre as anomalias magnética e gravimétrica. No caso da anomalia magnética ser gerada por uma única fonte, a polaridade encontrada, mínimo norte e máximo sul, está invertida em relação ao que se espera de um corpo nessa latitude magnética e campo atual, isto é máximo norte e mínimo sul. Levantam-se quatro possibilidades para explicar esse fato: 1 - a fonte geradora da anomalia tem susceptibilidade magnética bastante inferior à da rocha encaixante, o que é difícil de aceitar, pois a encaixante é constituída de sedimentos; 2 - o corpo foi magnetizado em outra latitude e removido para a região onde se encontra, o que parece ser muito improvável; 3 - o



**Figura 2.** Localização geográfica das sondagens AMT na região de Rodeio Velho.  
*Geographic location of AMT sites in Rodeio Velho.*



**Figura 3.** Perfis de Gravimetria e Magnetometria e seção de resistividade audiomagnetotélurica na região de Rodeio Velho. A Gravimetria e a Magnetometria foram realizadas pelo IPT. O sinal v indica presença de camada condutora e o x, camada resistiva, a partir da modelagem 1D.

*Gravimetric and magnetometric profiles and audiomagnetotelluric cross-section in Rodeio Velho. Gravity and Magnetometry data were collected by IPT/SP. The v signs indicate a conducting layer and the x a resistive layer, from 1-D modelling of AMT data.*

corpo sofreu rotação após a magnetização, para o que também faltam evidências geológicas; 4 - ocorrência de uma forte magnetização remanescente, devido a um resfriamento de uma intrusiva básica-ultrabásica durante um campo magnético reverso. A existência de uma intrusão, próximo à superfície, com centenas de metros de extensão e forte magnetização remanescente com polaridade reversa, muito embora satisfaça à anomalia magnética, não encontra respaldo nos dados gravimétricos.

O levantamento AMT na área teve por objetivo trazer novos subsídios à identificação das possíveis fontes dessas anomalias geofísicas. No caso da ocorrência de zonas de fraturamento (falhamentos), a existência de um maior volume de água intersticial, provavelmente favorecida por uma maior porosidade e/ou permeabilidade locais, seria revelada nas sondagens AMT pela detecção de regiões de baixa resistividade elétrica. Por outro lado, intrusões básicas-ultrabásicas gerariam uma camada resistiva, principalmente na direção perpendicular ao plano dessa estrutura, e, possivelmente, auréolas condutoras nas zonas contíguas, provenientes de fraturamentos e alterações mineralógicas, por ocasião da intrusão.

## CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO AMT

O método AMT de sondagens faz uso das variações da impedância, razão entre as variações naturais do campo elétrico horizontal pelo campo magnético horizontal ortogonal, determinadas em várias audiodfrequências, a partir das quais são estimadas as resistividades das camadas litológicas em várias profundidades. O desenvolvimento teórico do método presume a existência de extensas camadas horizontais isotrópicas, através das quais as correntes fluem. Assim, o método é mais eficiente em condições litológicas de pouca variação lateral e, quando aplicado na exploração mineral, pode ser utilizado na identificação de camadas condutoras, como por e-

xemplo zonas mineralizadas com extensa expressão horizontal, localizadas a poucas centenas de metros de profundidade. Entretanto, o fato de a corrente sempre fluir para o meio mais condutor, faz com que a direção das correntes induzidas sejam controladas pelas variações laterais da litologia, o que pode ser explorado favoravelmente na identificação de estruturas geológicas não muito complexas. Como as camadas condutoras atenuam o sinal, as maiores profundidades de penetração são obtidas em áreas de cobertura mais resistiva. Nas áreas que possuem cobertura condutora, o método alcança somente algumas centenas de metros de profundidade e se torna menos preciso na estimativa da profundidade das camadas (Lakanen, 1986).

O equipamento SAMT (Scalar Audio Magneto Telluric) utilizado é um sistema portátil fabricado pela Sagax Geophysical Inc. Esse sistema pesa cerca de 12 kg e consiste em um sensor magnético, dois eletrodos e cabos, ligando esses componentes a um monitor conectado a uma bateria recarregável.

A faixa de frequência varre de 1 a 5000 Hz, em passos de 0,1 e 1 Hz. A acurácia nominal fornecida pelos fabricantes é de 5% em resistividade. O monitor do sistema recebe os valores das variações dos campos ortogonais elétrico e magnético e determina a resistividade aparente pelo método de Cagniard (1953). Fornece também a estimativa da coerência entre as duas componentes, porém não calcula, nesse equipamento em particular, a fase entre essas componentes.

Operacionalmente, a técnica reduz-se à leitura dos valores das resistividades aparentes em função da frequência, em cada local de sondagem. Geralmente as sondagens são espacialmente distribuídas ao longo de uma linha ou de uma malha, de acordo com os objetivos do trabalho e a complexidade geológica local. Os principais problemas encontrados nas sondagens relacionam-se aos efeitos produzidos por estruturas geoeletricas locais anômalas, situadas próximo à superfície, ou por fontes de energia natural e artificial.

Para o AMT, a fonte dos sinais eletromagnéticos reside nas tempestades elétricas localizadas a grandes distâncias. Dessa maneira, a proximidade de redes de energia elétrica, motores e tempestades locais tem forte efeito sobre as leituras.

Neste estudo, os locais de sondagem foram selecionados de forma a minimizar possíveis efeitos de topografia e de ruído eletromagnético. Na medida do possível, escolheram-se sítios planos e com nível local de 60 Hz praticamente nulo, medido através de uma pequena sonda. As sondagens em cada estação foram efetuadas com o dipolo elétrico em duas direções ortogonais, N60W e N30E, respectivamente paralelo e perpendicular à direção principal das estruturas. A abertura do dipolo foi de 20 m e foram amostradas 12 frequências discretas entre 8 e 4500 Hz, igualmente espaçadas em escala logarítmica. Em cada frequência foram realizadas um mínimo de 5 leituras de resistividade aparente com valores altos de coerência, com a quantidade de amostras dependendo da dispersão dos resultados (maior a dispersão, maior a quantidade de medidas naquela frequência específica).

Os métodos interpretativos usuais de dados AMT utilizam diversos procedimentos, descritos a seguir em ordem de maior complexidade:

a) Pseudo-seção de resistividade aparente, na qual os valores observados, plotados em função da respectiva frequência, são interpolados, formando uma figura que fornece uma visualização grosseira da variação da resistividade com a profundidade.

b) Modelagem inversa em 1D e 2D e direta em 3D, sendo a primeira a mais comum por ser a mais rápida de ser obtida. Nessas modelagens, valores de resistividade e de espessura de cada camada são testados até se obterem resultados que mais se aproximem das resistividades aparentes medidas.

c) Seção de resistividade em função da profundidade ao longo de perfis, a partir dos dados das modelagens.

d) Mapas de isorresistividades no plano horizontal de qualquer profundidade, obtidos a partir de diversas seções de resistividade em função da profundidade.

Os três primeiros procedimentos foram empregados neste estudo e seus resultados são expostos nas discussões que se seguem. Na modelagem dos dados optou-se por inversões 1D, normalmente utilizadas na análise de dados AMT (ver discussão em Lakanen, 1986). A técnica de inversão mais comum nesses casos é a transformada de Niblett-Bostick (Niblett and Sayn Wittgenstein, 1960; Bostick, 1977), que fornece como resultado a variação contínua da resistividade com a profundidade. Conforme discutido por Vozoff (1991), esse tipo de análise é mais apropriado para situações geológicas nas quais esse tipo de comportamento é esperado (uma área geotérmica, por exemplo). No nosso caso, porém, o objetivo é interpretar uma seção sedimentar composta por diversas camadas homogêneas. O modelo mais apropriado a essa situação geológica é aquele formado por pilhas de camadas discretas. O algoritmo utilizado foi proposto por Jupp and Vozoff (1975).

## RESULTADOS

### Área de Santa Maria

Nessa área foram realizadas 6 sondagens AMT, ao lado de furos já existentes, conforme a Tab. 1. Esses furos apresentam uma camada que contém sulfetos, com exceção do furo que corresponde à sondagem SM6. Essa camada é considerada mineralizada nos furos das sondagens SM1, SM2, SM3 e SM4.

Devido a problemas técnicos com o equipamento, não foram obtidos resultados satisfatórios nas sondagens SM5 e SM6. Os dados coletados nas quatro sondagens restantes foram modelados, usando o algoritmo de Jupp and Vozoff (1975), e o resultado é mostrado na Tab. 2. Como exemplo dessa modelagem, é exibida na Fig. 4 a sondagem SM3. No



gráfico à esquerda, é apresentada a variação da resistividade aparente em função da frequência, obtida pela leitura do equipamento no campo. As barras verticais correspondem às dispersões das leituras em cada frequência amostrada, em cada direção ortogonal. Uma maior dispersão é atribuída a baixos valores da razão sinal-ruído, que podem advir tanto da fonte de energia eletromagnética como da própria estrutura geoeletrica. Os valores de resistividade aparente, para uma mesma frequência, tendem, em condições geoeletricas isotrópicas, a se sobrepor nas duas direções ortogonais de leitura e a divergirem em condições anisotrópicas ou nas proximidades de heterogeneidades laterais. Ainda na Fig. 4, as linhas contínuas e tracejadas correspondem ao melhor ajuste dos dados nas direções N30E e N60W dos eletrodos, respectivamente. No gráfico à direita, é mostrada a variação da resistividade em função da profundidade, que corresponde ao modelo teórico de camadas responsáveis pela curva de melhor ajuste, para as duas direções de leitura.

O resultado da sondagem SM3 é típico para as quatro sondagens na região de Santa Maria. Como pode ser observado na Tab. 2 e na Fig. 5, três camadas são suficientes para modelar os dados em todas as estações. A camada superior apresenta-se com espessura e resistividade bastante variáveis, respectivamente entre 51 e 89 m e 71 e 446 ohm.m. Desconsiderando a sondagem SM1, aparentemente atípica por ter camadas menos profundas, observa-se nas outras sondagens um pequeno afinamento dessa camada em direção ao norte (de SM3 ao sul, para SM2 ao norte), principalmente na direção N60W (gráfico à direita da Fig. 5). A camada intermediária, por outro lado, é bem mais condutora e a sua variação é menor, entre 16 e 38 ohm.m. O contato entre a camada superior e a intermediária coincide com o topo da zona mineralizada, nas sondagens SM3, SM4 e SM2. Nesse último caso (SM2), a comparação é feita com o furo PCA3-88-05 que fica próximo, ao invés do furo PCA3-90-04, do qual não temos informações litológicas.

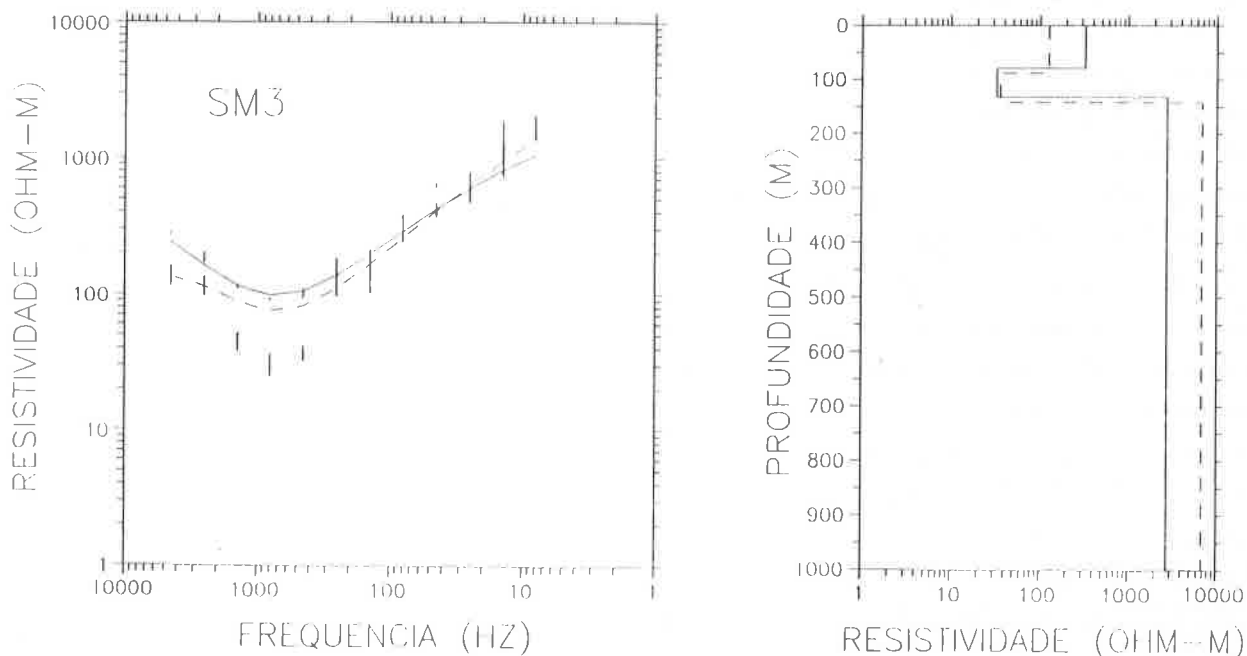
Essa camada condutora tem uma espessura aproximada de 50 m e pode corresponder à zona mineralizada. Ela se sobrepõe a uma camada bem mais resistiva, cujos valores ultrapassam 1000 ohm.m, situada a partir de profundidades ao redor de 130 m. Como pode ser observado, é inviável a detecção do embasamento cristalino, situado a várias centenas de metros de profundidade. Unidades geológicas relacionadas ao Grupo Bom Jardim, como por exemplo o topo do Membro Mangueirão, também não foram discriminadas. A existência de outras camadas condutoras não está excluída, caso sejam de inexpressiva espessura ou tenham pequeno contraste em resistividade, colocando-as fora do poder de resolução do sistema. Quanto à sondagem SM1, de resultado um pouco distinto das demais, é interessante apontar que a estação situa-se próximo a um pequeno lago e que as leituras foram realizadas em condições meteorológicas adversas. Ambos os fatores podem causar sérias perturbações nas medidas e levar a resultados não confiáveis.

Em Santa Maria, permanece aberta a comparação com sondagens realizadas em áreas onde existe, em subsuperfície, faixas com sulfetos.

### Área de Rodeio Velho

Nessa área foram efetuadas 15 sondagens AMT, geograficamente dispostas conforme mostra a Fig. 2, com exceção de duas sondagens, cujos dados são considerados inadequados por terem ocorrido problemas técnicos com a instrumentação.

Na terminologia comumente empregada em estudos de indução eletromagnética, as duas direções dos eletrodos, N30E e N60W, correspondem respectivamente aos modos transversos magnético (TM) e transversos elétricos (TE) de propagação de ondas eletromagnéticas. Geralmente, o modo TM é mais susceptível à presença de descontinuidades laterais, sendo usado, de forma qualitativa, para localizar essas inomogeneidades. O modo TE, por outro lado, é menos afeito a perturbações, sendo utilizado, quanti-



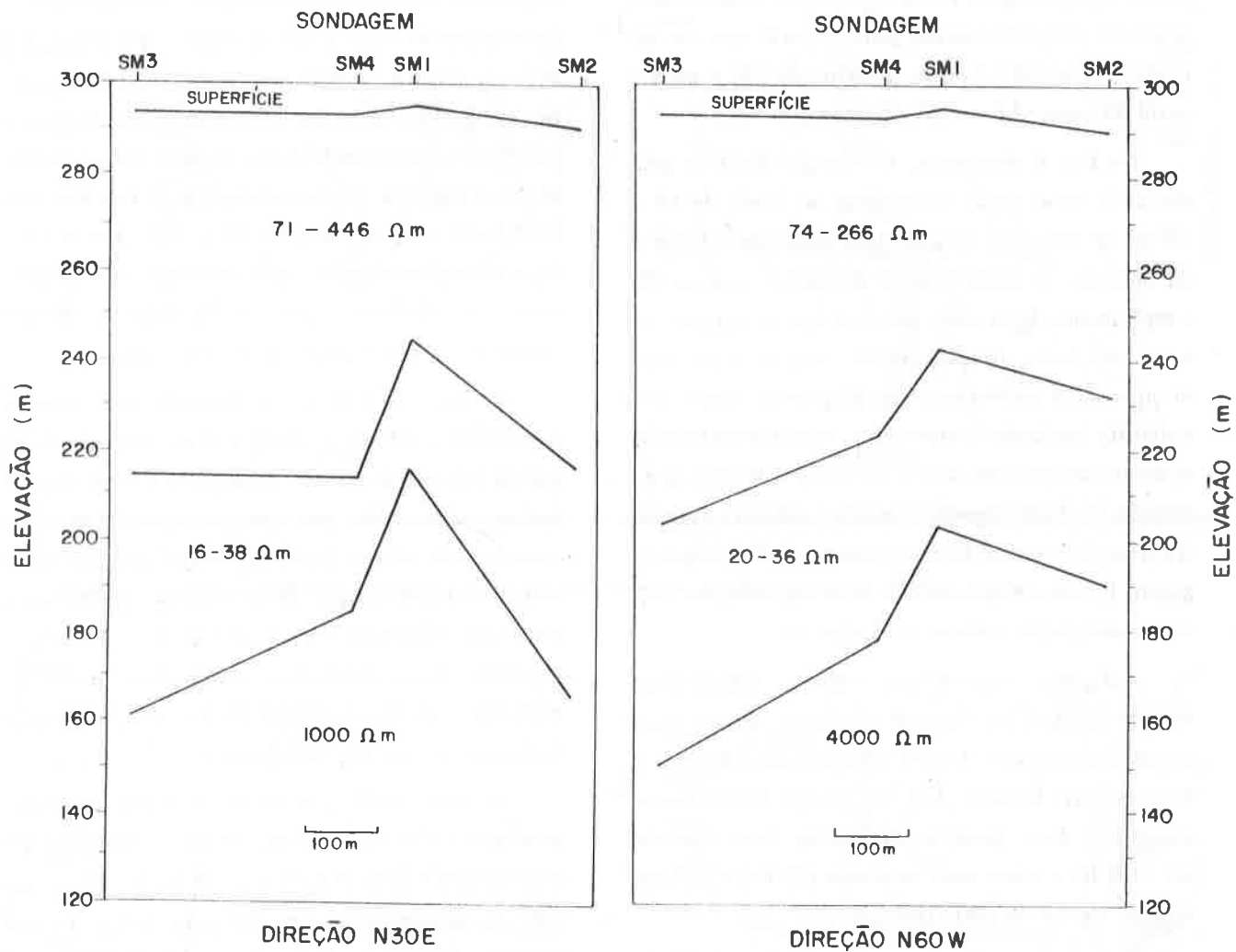
**Figura 4.** Inversão 1D da sondagem SM3. O gráfico à esquerda mostra a curva de melhor ajuste à variação da resistividade aparente em função da frequência. O gráfico à direita ilustra a profundidade e a resistividade das camadas necessárias para a obtenção do melhor ajuste. As barras indicam a dispersão das leituras e as linhas contínuas e tracejadas referem-se respectivamente às direções N30E e N60W do dipolo elétrico.

*1-D inversions of AMT data from SM3 site. The graph on the left shows a best-fit curve of apparent resistivities as a function of frequency. The one on the right shows the depths and resistivities of the layers for the best-fit. The error bars indicate data dispersion and the solid and dashed lines are related to the N30E and N60W directions, respectively.*

**Tabela 2.** Inversão dos dados das sondagens na região de Santa Maria. Valores de resistividade (RHO em ohm-m) e espessura (H em m) das camadas.

*Three-layer model inversions of AMT soundings in Santa Maria. Resistivity ( $\rho$ ) in ohm.m and thickness (H) in m.*

SONDAGEM		SM1	SM2	SM3	SM4
CAMADA		RHO H	RHO H	RHO H	RHO H
SUPERIOR	N60W	266,3 51,7	74,3 57,5	126,7 88,6	109,0 69,1
	N30E	446,0 50,9	127,8 75,1	323,5 79,1	70,6 78,6
INTERMEDIÁRIA	N60W	20,0 39,4	29,3 42,3	36,0 53,5	29,7 46,5
	N30E	15,9 29,4	37,4 49,8	32,8 52,9	17,6 30,4
INFERIOR	N60W	4063 -	4361 -	6830 -	4045 -
	N30E	18410 -	2635 -	2762 -	1009 -
ERRO DE AJUSTE	N60W	6,09%	5,59%	5,37%	2,11%
	N30E	15,2%	1,72%	1,09%	2,83%



**Figura 5.** Secções geoelectricas baseadas nas inversões das sondagens AMT na região de Santa Maria.  
*Geoelectric sections based on the AMT data modelling, in the two directions, in Santa Maria area.*

tativamente, em modelagens com geometria 1D para interpretar a variação da resistividade com a profundidade (ver Lakanen, 1986). Ambas as características são claramente evidenciadas nas Fig. 6 e 7, que mostram duas pseudo-seções de resistividade aparente, respectivamente para o perfil que vai do ponto 20S ao 5N (direção aproximada NS) e para o perfil do ponto A1 ao 2N\* (direção NE-NW).

Na Fig. 6 observa-se, na direção N30E, a presença de duas zonas condutoras ao norte de 5S e ao sul de 10S, com resistividade aparente inferior a 50 ohm.m. A parte central do perfil, estação 7S, é tipicamente bem mais resistiva que o restante da área. Na outra direção, N60W, nota-se a presença de uma faixa condutora para frequências superiores a 450 Hz (próximo à superfície), com a resistividade aparente alcançando valores inferiores a 40 ohm.m na estação 5S. Uma segunda camada condutora aparece em frequências mais baixas (maiores profundidades), porém localizada apenas sob uma das estações (5S, com resistividade inferior a 80 ohm.m).

A Figura 7 mostra duas regiões condutoras na direção N30E. Essa camada condutora parece mais próxima à superfície a oeste (estações A1 e A2) que a leste do perfil (estação A3). Na direção N60W temos novamente duas camadas condutoras, uma centrada em 1400 Hz e outra mais profunda (25 Hz) e restrita à parte central do perfil (estação 5S).

As pseudo-seções mostram então a ocorrência de descontinuidades laterais próximas à região central dos perfis (especialmente a estação 5S), uma camada condutora próximo à superfície em toda a área em estudo e uma segunda camada condutora, mais profunda, restrita principalmente à estação 5S.

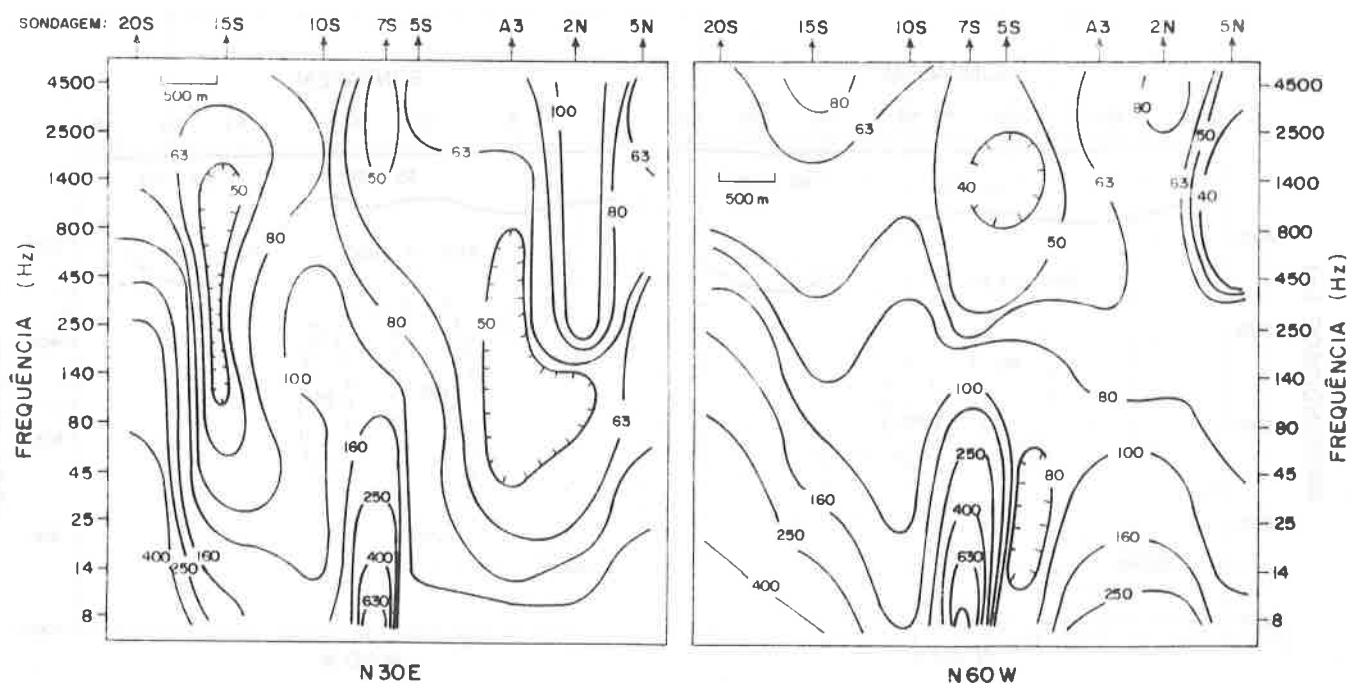
Todos os dados de sondagens foram modelados com 3 camadas, exceto as sondagens 5S e 10S, que foram modeladas com 5 camadas. As Figuras 8 e 9 resumem, respectivamente, os perfis NS (20S-5N) e NE-SW (A1-2N\*). Comparando os resultados dessa região com os de Santa Maria, observa-se que a se-

gunda camada condutora, onde se concentram os sulfetos mineralizados, é aparentemente mais resistiva (variação de 16 a 38 ohm.m em Santa Maria e de 35 a 76 ohm.m em Rodeio Velho). Se a presença de sulfetos contribuir efetivamente para aumentar a condutividade elétrica dos arenitos, esses resultados indicam que sua concentração deve ser bastante inferior em Rodeio Velho que em Santa Maria. Outra característica interessante dessas figuras é a ocorrência de uma segunda região condutora, a maiores profundidades, sob as estações 5S e 10S. Por ser extremamente localizada e não detectada em estações próximas, constitui-se em um indicador de descontinuidades crustais próximas a essas estações.

A Figura 10 ilustra a modelagem em 3 camadas da sondagem A3: uma superior, com espessura de algumas dezenas de metros, sobreposta a uma camada menos resistiva que, por sua vez, encontra-se sobre uma camada inferior localizada a poucas centenas de metros de profundidade. Nesse exemplo observa-se, a partir das diferenças entre as curvas de resistividade, uma substancial anisotropia entre as duas direções de medidas, o que torna problemática a interpretação da espessura da camada condutora.

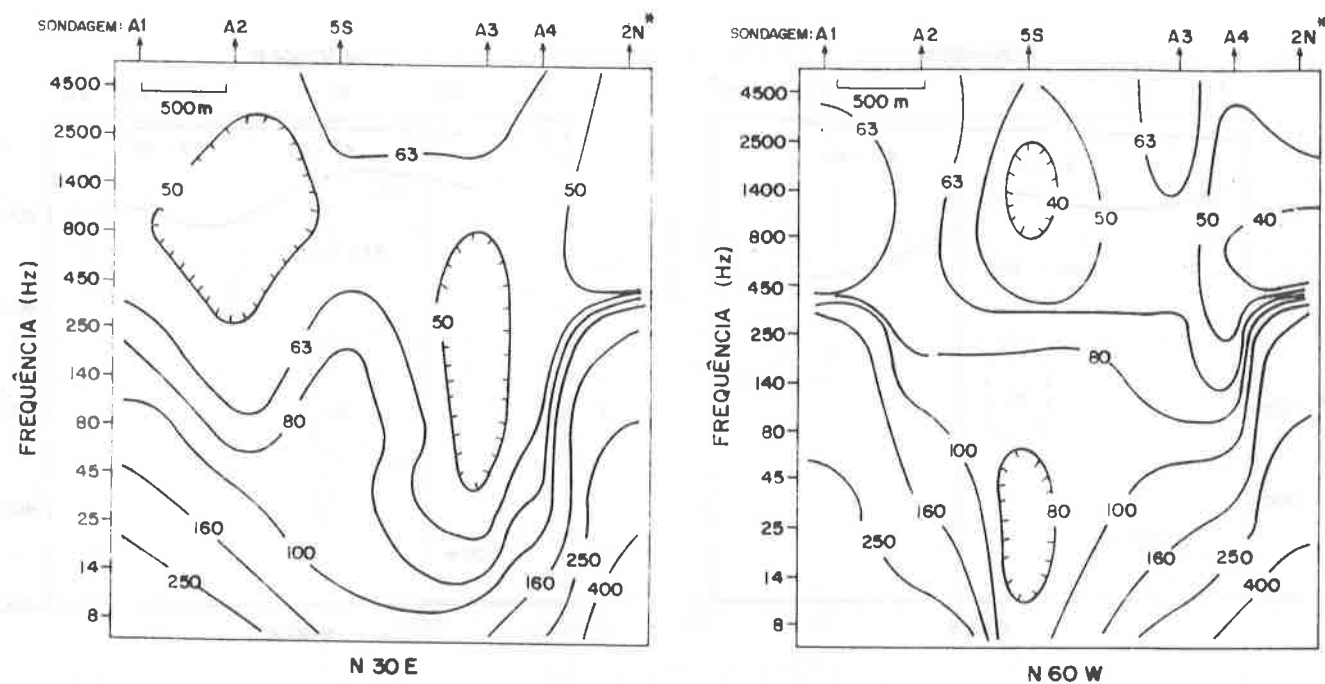
Na parte norte e sudoeste, os dados de sondagens apresentam-se com distribuição extremamente descontínua e perturbados por efeitos locais, o que dificulta sobremaneira a modelagem. A Fig. 11, por exemplo, mostra os dados da sondagem 2N\*, onde é nítido um salto brusco no valor da resistividade aparente em frequências próximas a 300 Hz. A causa desse comportamento atípico pode advir tanto de efeitos artificiais (motores, rede elétrica) como naturais, relacionados a geoestruturas locais (falhas, dobras, intrusões). As estações que apresentaram perturbações dessa natureza não foram utilizadas em nossas análises quantitativas (ver Fig. 9).

Já a Fig. 12 ilustra o resultado de uma inversão 1D com 5 camadas para a sondagem 5S, localizada na parte central do levantamento. Nesse exemplo, nova-



**Figura 6.** Pseudo-seção de resistividade aparente na direção norte-sul, para as duas direções de leitura, na região de Rodeio Velho.

*NS pseudo-sections of apparent resistivities, in the two observation directions, in Rodeio Velho.*



**Figura 7.** Pseudo-seção de resistividade aparente na direção NE-SW de Rodeio Velho.

*NE-SW pseudo-sections of apparent resistivities, in the two observation directions, in Rodeio Velho.*

## Sondagens Audiomagnetotelúricas nas Proximidades das Minas do Camaquã (RS, Brasil)

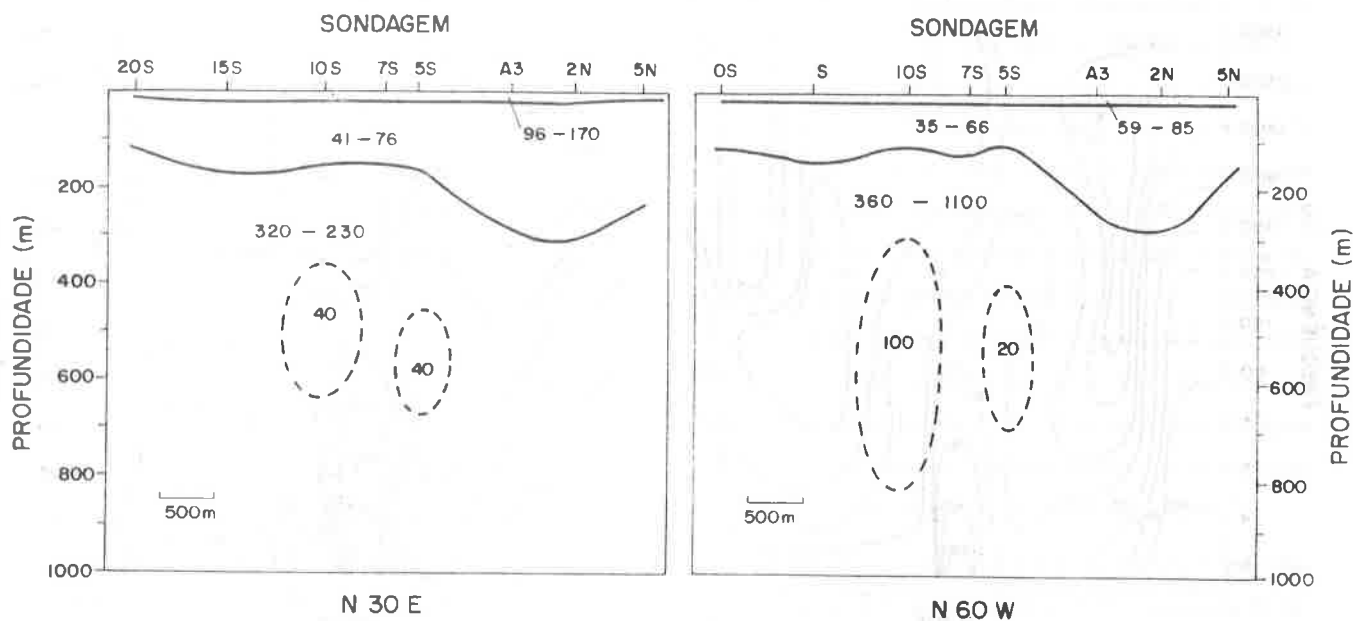


Figura 8. Perfil NS que mostra as camadas geolétricas com o intervalo de resistividade obtido pelas inversões dos dados na direção N30E e N60W, região de Rodeio Velho.

*NS cross-section showing geoelectric layers with resistivity intervals obtained from data inversion of N30E and N60W directions, in Rodeio Velho.*

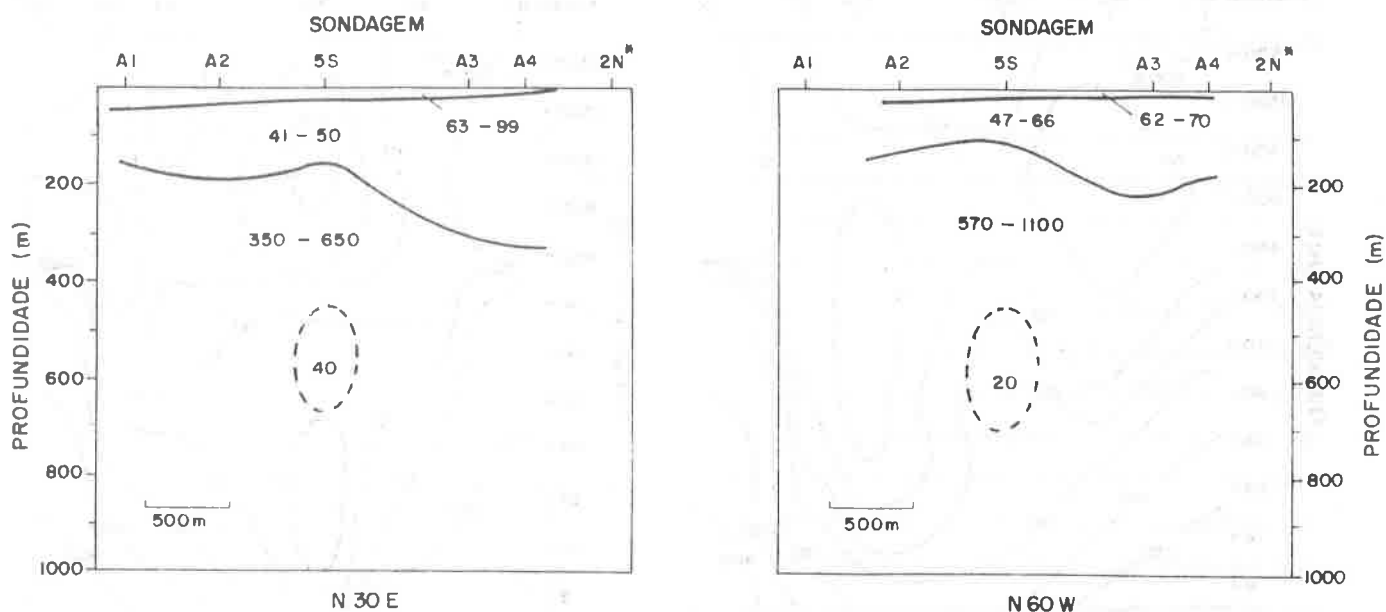
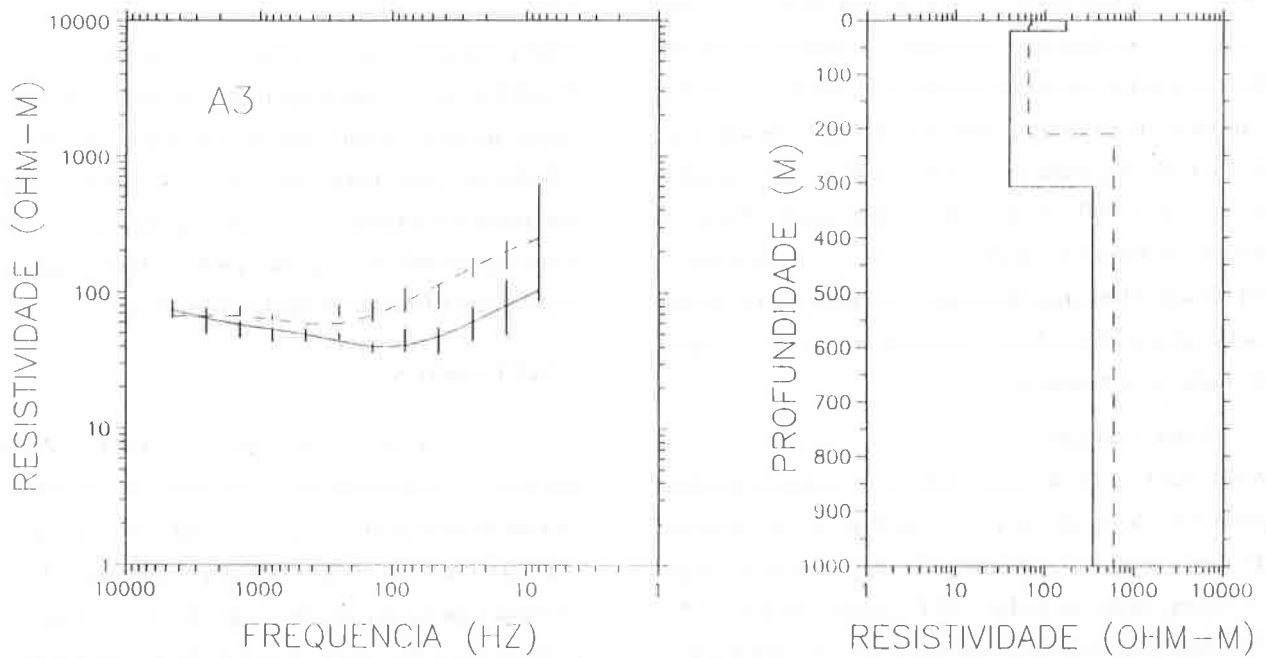


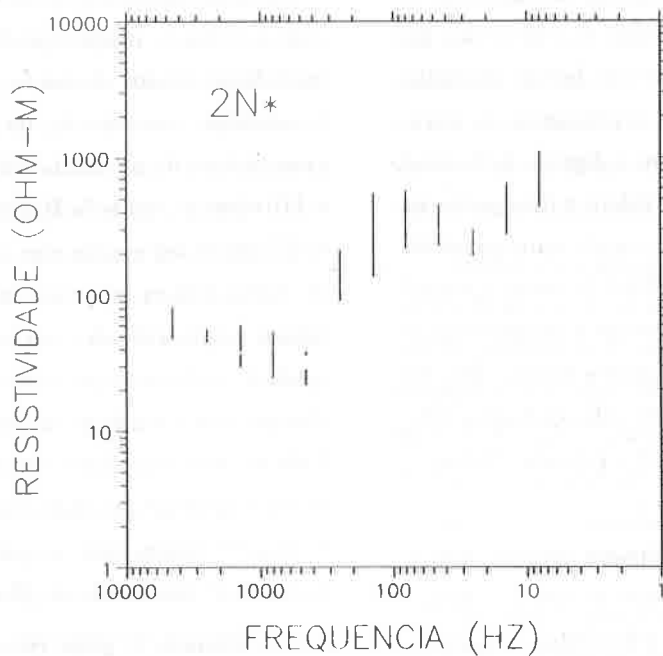
Figura 9. Distribuição espacial das camadas geolétricas em função da profundidade na direção aproximada NE-SW, região de Rodeio Velho.

*NE-SW cross-section of the geoelectric layers as a function of depth, in the two observation directions, in Rodeio Velho.*



**Figura 10.** Modelagem em três camadas dos dados AMT da sondagem A3: do lado esquerdo, resistividade aparente em função da frequência das leituras; do lado direito é ilustrada a profundidade utilizada para modelar os dados AMT.

*Three-layer modelling of AMT data from the A-3 site: apparent resistivities are shown on the left as a function of frequency; the depths used in the model are shown on the right.*



**Figura 11.** Ilustração de dados AMT cuja distribuição apresenta problemas de modelagem.

*Illustration showing AMT data which present modelling problems.*

mente são observadas diferenças nos dados nas duas direções dos eletrodos, indicando anisotropia que dificulta a definição da espessura e da resistividade das camadas. É patente a presença de uma camada condutora de espessura entre 150 a 200 m, aproximadamente entre 450 e 650 m de profundidade. Essa camada condutora é também encontrada na sondagem da estação 10S, mas não aparece na estação 7S, localizada entre a 5S e a 10S, a cerca de 500 m de distância de cada uma dessas estações.

Uma comparação preliminar dos resultados AMT com os perfis gravimétrico e magnetométrico pode ser observada a partir da Fig. 3. Analisando de norte para sul, no intervalo A, definido no topo da figura, tanto os dados AMT (sondagens 5N, 5N\* e 2N\*, nas quais não foi possível obter resultados quantitativos 1D) como gravimétricos indicam condições extremamente perturbadas (possivelmente falhas); no intervalo B são encontradas as maiores espessuras da camada B (sondagens 2N, A3, A4); no intervalo C, coincidente com a localização esperada para o corpo que gera a anomalia magnética, as sondagens apresentam zonas condutoras ao redor de uma zona resistiva, o que pode ser indicativo de faixas alteradas relacionadas ao corpo anômalo; a passagem do intervalo B para o C relaciona-se com o decaimento de 1 mGal no perfil gravimétrico, o que fortalece a interpretação de espessamento da camada para norte como causa da anomalia gravimétrica; o intervalo D, relativamente homogêneo em termos gravimétricos e magnéticos, é representado pelos resultados das sondagens 15S, A2 e A1 e o intervalo E, representado pela sondagem 20S, exibe grandes variações de curto período (falhas?) nos dados de campo potencial.

A conjugação desses resultados mostra que a anomalia gravimétrica é realmente gerada por falhas no interior do pacote sedimentar, enquanto a origem da anomalia magnética permanece inexplicada. Sua possível correlação com hidrotermalismo nas proximidades da falha parece descartada,

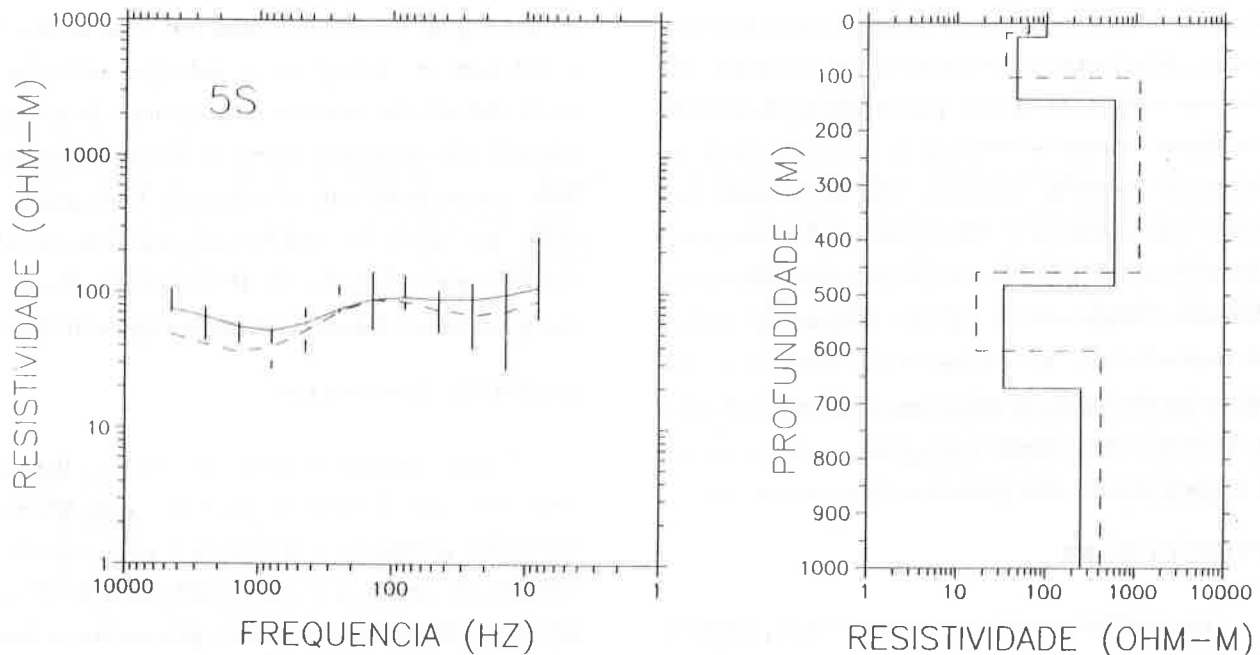
visto que esse processo tenderia a transformar magnetita em pirita, não gerando a anomalia observada. Também, pela modelagem magnética efetuada, o corpo anômalo deveria ser mais extenso lateralmente e deslocado para norte, em relação aos limites impostos pelas sondagens 5S e 10S. Apenas um levantamento gravimétrico regional poderia trazer subsídios para a identificação da fonte magnética.

## DISCUSSÕES

A interpretação das sondagens AMT realizadas em Rodeio Velho confirma a presença de centenas de metros de sedimentos, provavelmente afetados por estruturas verticais (falhas?) e pela existência de uma camada condutora no intervalo de 450 a 650 m de profundidade na parte central do levantamento, a qual pode ter alguma relação com a anomalia magnetométrica observada em trabalho anterior. A indicação de estruturas verticais baseia-se na existência de descontinuidades laterais na resistividade medida das rochas, nas bordas do levantamento, em coincidência geográfica com a localização das anomalias gravimétrica e magnetométrica. Genericamente, o modelamento dos dados foi obtido com modelos de 3 camadas: camada A, na parte superior, com alguns metros de profundidade e resistividade entre 60 a 170 ohm.m; camada B, com aproximadamente 100 a 120 m de espessura nas sondagens da parte sul e de 200 a 250 m na parte mais ao norte do levantamento e resistividades entre 35 a 75 ohm.m, e a camada C, inferior, com resistividade entre 320 a 1100 ohm.m, estendendo-se além dos limites de sensibilidade do método. Uma camada condutora D foi observada somente em duas sondagens na parte central do levantamento, entre as profundidades de 450 e 650 m e com resistividade de 20 a 100 ohm.m.

A camada A pode estar relacionada à zona intemperizada da superfície acima do nível freático ou pode estar indicando o contato inferior do Grupo Camaquã, uma hipótese menos provável. Nesse último





**Figura 12.** Exemplo de dados AMT e subsequente modelagem com 5 camadas. A simbologia é idêntica à da Figura 4.

*AMT data example of a five-layered modelling. Symbols are the same as in Figure 4.*

caso, o Grupo Camaquã teria pequena espessura e as camadas B, C e D corresponderiam a variações geoeletricas dentro do Grupo Bom Jardim. Inferências sobre a relação da camada condutora D com a anomalia magnetométrica aguardam um aprimoramento da modelagem dessa anomalia. Entretanto, em um outro trabalho, Padilha et al. (1992) discutem a possibilidade dessa camada condutora ser um aquífero transiente, que se recarrega com o retorno sazonal da precipitação. A observação dessa camada condutora, nesse local específico e na época dessa campanha, seria um indicador precoce dessa recarga. Ela ocorreria através de um suposto favorecimento de infiltração rápida de águas meteóricas, no início do período chuvoso, por uma provável falha vertical, indicada pelos dados gravimétricos. Por outro lado, o degrau rebaixado observado no contato entre as camadas B e C, entre a porção sul e norte do perfil, provavelmente decorre de um espessamento da camada B para o norte. É interessante observar que esse

fenômeno não ocorre na camada A. Pseudo-seções de resistividade aparente e resultados de modelagem dos dados de sondagens indicam a possibilidade de existência de outros falhamentos, que aproximadamente coincidem com os prolongamentos das falhas mostradas no Mapa Geológico do DNPM, a NW e SE da área trabalhada.

Quanto às sondagens nas áreas mineralizadas de Santa Maria, o modelamento dos dados foi também obtido a partir de 3 camadas: a camada A apresenta resistividades entre 74 e 446 ohm.m e espessuras de 50 e 90 m; uma camada condutora B intermediária, de espessura entre 30 a 54 m e resistividade de 16 a 38 ohm.m; e a camada C, inferior, com resistividades maiores do que 1000 ohm.m.

A camada geoeletrica A situa-se dentro da camada de conglomerados do Membro Vargas. A camada condutora B não tem concordância litológica aparente, porém coincide com a posição da faixa mineralizada. O contato entre as camadas A e B tem

grande concordância com o topo da faixa mineralizada. Não foram observadas outras camadas condutoras abaixo da B e a possibilidade de existência dessas estruturas restringe-se à ocorrência de camadas de reduzida espessura e/ou de pequeno contraste com a camada C. Não foram também encontrados indicadores geoeletricos que correspondessem ao Membro Mangueirão, a algumas centenas de metros de profundidade. As sondagens nas áreas não-mineralizadas não foram satisfatórias, o que impossibilitou a verificação dos objetivos traçados, sendo necessário o prosseguimento dos trabalhos magnetotelúricos.

### CONCLUSÕES

Os resultados alcançados apresentam aspectos positivos que recomendam a continuação das investigações magnetotelúricas na prospecção de sulfetos. É importante ressaltar, na área de Santa Maria, a coincidência na profundidade da camada condutora obtida pela sondagem AMT com a zona mineralizada e, na área de Rodeio Velho, a existência de camadas condutoras e estruturas geoeletricas provavelmente relacionadas às anomalias magnetométrica e gravimétrica.

Na área de Santa Maria é recomendável efetuar sondagens adicionais, principalmente em regiões onde sulfetos não foram detectados nos testemunhos dos furos. Na área de Rodeio Velho é interessante densificar as sondagens a partir da zona central da anomalia aeromagnética. Entretanto, com a expansão da eletrificação rural na região, o equipamento atual pode não apresentar os resultados esperados, requerendo uma fonte controlada e aquisição da variação da fase entre o campo elétrico e magnético, além das variações já mensuradas de resistividade aparente.

Um outro aspecto a ser abordado refere-se a possíveis interpretações alternativas aos dados aqui apresentados. A partir da não-unicidade inerente à inversão de dados geofísicos, a separação de curvas

de sondagens magnetotelúricas em seus modos TE e TM pode ser interpretada tanto por variações na profundidade das camadas homogêneas de um meio estratificado, como por variações laterais de resistividade em um meio com camadas não-homogêneas. A opção pelo primeiro modelo aqui sugerida encontra respaldo nos resultados de IP em Santa Maria, os quais atestam a homogeneidade litológica da área.

### AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao Sr. Henrique Anawate, como Presidente da CBC, pela liberação dos dados geológicos e geofísicos e pelo suporte ao trabalho de campo, a Vicente Galli, do IPT/SP, pela permissão do uso de seus dados gravimétricos levantados para a CBC, e a três revisores anônimos, pelas valiosas sugestões apresentadas.

### REFERÊNCIAS

- BOSTICK, Jr., F.X.** (1977) A Simple and Almost Exact Method of MT Analysis. Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration (Abstracts), Snowbird, Utah.
- CAGNIARD, L.** (1953) Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics*, 18:605-635.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (DNPM)** (1970) Folha Geológica do Passo do Cação. Executado pela CPRM, escala 1:50.000, Porto Alegre, RS.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT/SP)** (1981) Estudos Geofísicos pelo Método de Polarização Induzida em Áreas de Pesquisa Próximas às Minas de Camaquã, em Caçapava do Sul, RS. Relatório Técnico IPT 15.205.

- JACKSON, V.N.** (1973) Projeto Aerogeofísico Camaquã, Estado do Rio Grande do Sul. Convênio DNPM/CPRM/CNEN, Porto Alegre, RS, inédito.
- JUPP, D.L.B. and VOZOFF, K.** (1975) Stable Iterative Methods for the Inversion of Geophysical Data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42:957-976.
- LAKANEN, E.** (1986) Scalar Audiomagnetotellurics Applied to Base-Metal Exploration in Finland. *Geophysics*, 51:1628-1646.
- NIBLETT, E.R. and SAYN WITTGENSTEIN, C.** (1960) Variation of Electrical Conductivity with Depth by the Magnetotelluric Method. *Geophysics*, 25:998-1008.
- PADILHA, A.L., VITORELLO, Í., TRIVEDI, N.B., RIBEIRO, M.J. and GROSS, J.M.** (1992) Seasonal Variation in Apparent Resistivity Probably Associated with Drastic Rainfall Changes in Southern Brazil. *J. Geomag. Geoelectr.*, 44:651-660.
- STRANGWAY, D.W. and KOZIAR, A.** (1979) Audio-Frequency Magnetotelluric Sounding A Case History at the Cavendish Geophysical Test Range. *Geophysics*, 44:1429-1446.
- TEIXEIRA, G., GONZALES, A.P., GONZALES, M.A. and LICHT, .A.B.** (1978) Situação das Minas do Camaquã, RS. *Anais XXX Congr. Bras. Geol.*, 4:1893-1905, Recife - PE.
- VOZOFF, K.** (1991) The Magnetotelluric Method. In: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Applications*, M.N. Nabighian, ed., SEG, 641-711.

Submetido em 15.06.92  
Revisado em 03.06.93  
Aceito em 04.06.93  
Editor associado L. Rijo