

EFEITOS DO ELETROJATO EQUATORIAL SOBRE A RESISTIVIDADE APARENTE E A FASE NO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Joaquim Perminio de Oliveira Mota¹ & Luiz Rijo²

O método magnetotelúrico (MT) se baseia na hipótese de que o campo eletromagnético incidente é constituído por ondas planas emitidas do zênite. Nas latitudes médias do hemisfério norte, onde são realizados a maioria dos trabalhos de MT, esta hipótese é perfeitamente válida, haja visto o imenso sucesso alcançado em inúmeros levantamentos magnetotelúricos. Na região equatorial, entretanto, esta hipótese não é totalmente válida por causa de uma fonte de corrente na ionosfera, denominada eletrojato equatorial, que emite ondas eletromagnéticas não necessariamente planas.

O objetivo desse trabalho é investigar a influência do eletrojato equatorial nos dados de MT de estruturas bidimensionais, paralelas e perpendiculares à direção E-W do eletrojato. Para isso, foram considerados três tipos de fontes: a) ondas planas, b) uma linha de corrente e c) uma lâmina horizontal com distribuição gaussiana de corrente; as duas últimas localizadas a 110 km de altura. Através da simulação feita por elementos finitos, os resultados (resistividade aparente e fase) correspondentes aos três tipos de fontes foram meticulosamente analisados e comparados entre si. Conclui-se daí que o eletrojato não influi nas respostas MT de estruturas geológicas rasas (menor que 2000 m de profundidade). No entanto, a influência pode ser bastante apreciável no caso de estruturas geológicas profundas, resistivas e de grande dimensão. A influência é maior nas respostas de estruturas com *strike* paralelo ao eletrojato. Um embasamento condutivo praticamente não afeta os efeitos do eletrojato, enquanto que um embasamento resistivo causa profundas mudanças nos resultados, principalmente nas baixas frequências. Em decorrência, os valores de resistividade aparente observados próximo ao ponto diretamente abaixo do centro do eletrojato são sempre menores do que os da onda plana, enquanto que os dos pontos distantes são bem maiores. Os valores de fase se comportam de maneira inversa aos de resistividade aparente.

Em suma, nos levantamentos de bacias sedimentares pelo método MT a influência do eletrojato equatorial não é totalmente desprezível. Consequentemente, é necessário que se compreenda bem os seus efeitos para facilitar a interpretação dos dados de MT em regiões equatoriais.

EQUATORIAL ELECTROJET EFFECTS ON THE APPARENT RESISTIVITY AND PHASE VALUES ON THE MT METHOD – The magnetotelluric method (MT) is based on the assumption that the incident electromagnetic field is a plane wave from zenith. In the mid latitudes of the north hemisphere, where most of the MT works have been carried out, the plane wave hypothesis is perfectly valid, as shown by a large number of successful magnetotelluric surveys. However, in the equatorial region the plane wave assumption is not totally valid due to a very strong source of electrical current in the ionosphere, called equatorial electrojet which emits electromagnetic waves not necessarily plane.

1. Curso de Pós-Graduação em Geofísica, CG, Universidade Federal do Pará, Caixa Postal 309, 66000 Belém, PA

2. Departamento de Geofísica, CG, Universidade Federal do Pará, Fax: (091) 229.9677, Caixa Postal 1611, 66050 Belém, PA

The objective of this work is to investigate the influence of the electrojet on the MT data of two-dimensional structures with strikes parallel and perpendicular to E-W direction of the electrojet. Three kinds of source fields are considered: a) plane wave, b) an infinite current line, and c) a horizontal current sheet with Gaussian distribution the last two at 110 km above the ground. Using the finite element simulation, the apparent resistivity and phase of the surface impedance related with the three types of sources were carefully analysed. It is found that, the electrojet does not effect the MT response of shallow geological structures (less than 2000 m). However, the effects are very large for resistive, deep and broad structures. The influence is large if the strike of the structures is parallel to the electrojet. The effects of the electrojet are not influenced by a conductive basement, whereas a resistive basement causes profound changes in the results, especially at low frequencies. For example, the values of apparent resistivity near the point directly below the electrojet center are smaller than those of the plane wave, whereas the remote ones are much bigger. The phase values behave inversely to those of apparent resistivity. In conclusion, the influence of the equatorial electrojet on the MT surveys on sedimentary basins is significant. Consequently, it is necessary to have a good understanding of its effects in order to interpret MT data in equatorial regions.

INTRODUÇÃO

No método magnetotelúrico (MT) proposto por Thikhonov (1950) e Cagniard (1953) considera-se o campo eletromagnético incidente como sendo ondas planas emitidas do zênite. No início, esta hipótese sobre o campo incidente foi questionada por vários pesquisadores (Price, 1962; Wait, 1962). Acreditava-se, por exemplo, que a complexidade do comportamento das impedâncias observadas na superfície do terreno era, em grande parte, devido a variação elétrica na fonte, e por isso, argumentava-se que a hipótese de supor o campo incidente como ondas planas não era totalmente válida. No entanto, vários estudiosos concordaram com o modelo de Thikhonov e Cagniard. Madden & Nelson (1965), por exemplo, mostraram que a complexidade comumente observada nos dados magnetotelúricos era, em grande parte, devido a maneira como eram definidas as impedâncias de superfície em regiões com variação lateral de condutividade e não simplesmente devido a variações na fonte. Posteriormente, Demitriev & Berdichevsky (1979) analisando cuidadosamente o modelo de Thikhonov e Cagniard, confirmaram a sua validade nos trabalhos de exploração geofísica, principalmente quando a área prospectada é relativamente pequena em relação a curvatura da Terra. Atualmente, a hipótese Thikhonov e Cagniard é aceita universalmente.

Os questionamentos sobre a influência das fontes nos dados magnetotelúricos, acima referidos, foram feitos levando em consideração as condições geoeletricas da ionosfera no hemisfério norte. Entretanto, em regiões equatoriais é de se esperar que a hipótese de Thikhonov e Cagniard não seja totalmente válida, em

virtude da existência de uma fonte de corrente localizada na ionosfera e orientada na direção E-W, denominada eletrojato equatorial (Mareschal, 1986; Trivedi, 1989).

Diversos autores usando o modelamento numérico simularam a resposta magnetotelúrica de regiões continentais na presença do eletrojato. Hermance & Peltier (1970) investigaram um modelo de duas camadas para representar meios continentais e áreas tectonicamente ativas na presença de uma linha de corrente situada a uma altura de 500 km, e chegaram a conclusão que a hipótese de Thikhonov e Cagniard é válida nesse caso particular. Peltier & Hermance (1971) estenderam os resultados do trabalho anterior, usando no lugar da linha, uma distribuição planar de corrente com dependência gaussiana na direção N-S, localizada a 110 km de altura. Eles concluíram que o efeito da fonte cresce com a resistividade da sub-superfície, e que as técnicas convencionais de interpretação são mais restritas em áreas continentais do que em áreas tectonicamente ativas. Ademais, para um dado substrato, o efeito da fonte aumenta com o período em uma dada localização, porém decresce com a distância ao centro do eletrojato. As observações correspondentes a períodos longos, feitas em estações diretamente abaixo do centro do eletrojato, tendem a subestimar os valores de resistividade e superestimar os valores da fase, enquanto o inverso é observado nas estações distantes do centro do eletrojato.

Hibbs & Jones (1973a, b) generalizaram a análise feita por Peltier & Hermance (1971) para incluir o efeito de fontes simétricas e assimétricas. Nestes trabalhos foi utilizada a técnica de diferenças finitas para determinar a resposta magnetotelúrica de modelos

contendo heterogeneidades bidimensionais. Os resultados demonstram que para períodos longos a configuração da fonte influencia consideravelmente o valor da resistividade aparente.

Hermance (1984) descreve uma solução aproximada para indução eletromagnética por uma fonte bidimensional paralela ao "strike" de um corpo anômalo bidimensional. Ele mostrou que sob certas condições, a resposta, na vizinhança da heterogeneidade lateral, tem pouca influência da fonte.

Em todos trabalhos acima referidos, voltados principalmente para estudos geotectônicos, os autores consideraram a direção das correntes nas fontes como sendo paralela ao "strike" das estruturas bidimensionais.

Nesse trabalho investigamos a influência do eletrojato nos dados magnetotéluricos devido a estruturas bidimensionais em bacias sedimentares de interesse na prospecção de petróleo. Para simular o eletrojato consideramos dois tipos de fontes: a) uma linha de corrente na direção E-W e b) uma distribuição bidimensional planar gaussiana com desvio padrão de 240 km, ambas a 110 km de altura. Analisamos não apenas o caso de estruturas com "strike" paralelo como também estruturas com "strike" perpendicular ao eletrojato.

METODOLOGIA

Segundo McNish (1938) e Hermance & Peltier (1970), uma linha de corrente localizada a 100 km de altura, pode ser considerada uma boa aproximação de um eletrojato equatorial bastante disperso. Um modelo mais apropriado para o eletrojato, segundo Peltier & Hermance (1971) e Hibbs & Jones (1973a, b), é uma distribuição planar gaussiana de corrente com 240 km de desvio padrão localizada a 110 km de altura. Nesse caso a resposta é obtida integrando todas as respostas individuais de linhas infinitas de corrente de intensidade variando de acordo com a distribuição gaussiana.

Sabe-se, da teoria do método MT, que o campo eletromagnético induzido por estruturas bidimensionais na presença de ondas planas se desacopla nos modos TE e TM, enquanto que uma linha de corrente paralela ao strike excita apenas o modo TE (Kaufmann & Keller, 1981). Entretanto se a linha de corrente for perpendicular ao strike, os dois modos, TE e TM, não se desacoplam e portanto devem ser tratados simultaneamente (Rijo, 1989). Por essa razão, os problemas de simulação numérica de estruturas bidimensionais com ondas planas e linha de corrente paralela ao strike são bem mais simples do que os de linha de corrente perpendicular ao strike.

Todavia, se a linha de corrente, perpendicular ao strike, estiver localizada a uma altura muito grande

com relação à superfície do terreno, como é caso do eletrojato, então podemos supor, com base na teoria das ondas planas, que a contribuição do modo TE é muito pequena comparada ao modo TM. Naturalmente esta hipótese não seria válida se a linha estivesse próxima à superfície (Rijo, 1989).

Com isso, os problemas bidimensionais tratados aqui são de dois tipos: a) estruturas paralelas (modo TE) e b) estruturas perpendiculares (apenas o modo TM é considerado) ao eletrojato. Para solucionar numericamente esses problemas usamos o algoritmo dos elementos finitos (Rijo, 1977; Wannamaker et al., 1987).

Para facilitar o manuseio das fontes e garantir melhor estabilidade numérica, é conveniente empregar a técnica de separação do campo eletromagnético em primário e secundário (Wannamaker et al., 1987; Rijo, 1989). O campo primário corresponde à resposta do meio estratificado sem as heterogeneidades laterais e é obtido analiticamente. O campo secundário, corresponde à resposta das heterogeneidades, sendo computado numericamente através do algoritmo de elementos finitos.

O leitor interessado encontrará mais detalhes sobre a formulação e solução dos problemas aqui tratados em Rijo (1989) e Mota (1991).

ANÁLISES DOS EFEITOS DO ELETROJATO

Para analisar os efeitos do eletrojato, comparamos as resistividades aparentes ρ_a e fase ϕ_a de cinco modelos uni e bidimensionais sujeitos a três tipos de fontes: a) ondas planas, b) linha infinita de corrente na direção E-W e c) eletrojato gaussiano também na direção E-W. A partir de agora, a *linha infinita de corrente* e o *eletrojato gaussiano* serão tratados, respectivamente, de linha e eletrojato, para facilitar a leitura do texto.

Inicialmente, são analisados perfis magnetotéluricos em função da distância em relação a um ponto diretamente abaixo da linha ou do centro do eletrojato. Em seguida, são analisadas sondagens magnetotéluricas (SMT) deslocadas em relação à linha e ao centro do eletrojato. Em todas as figuras os resultados correspondentes a onda plana são representados pela linha cheia, os da linha de corrente pelo sinal + e os do eletrojato por retângulos.

MODELO 1. Semi-espço homogêneo

O primeiro modelo estudado corresponde a um semi-espço homogêneo de resistividade igual a 10 Ωm . A linha de corrente e o centro do eletrojato estão localizados a 110 km verticalmente acima da estação zero (a origem). Na faixa de frequência de 1000 a

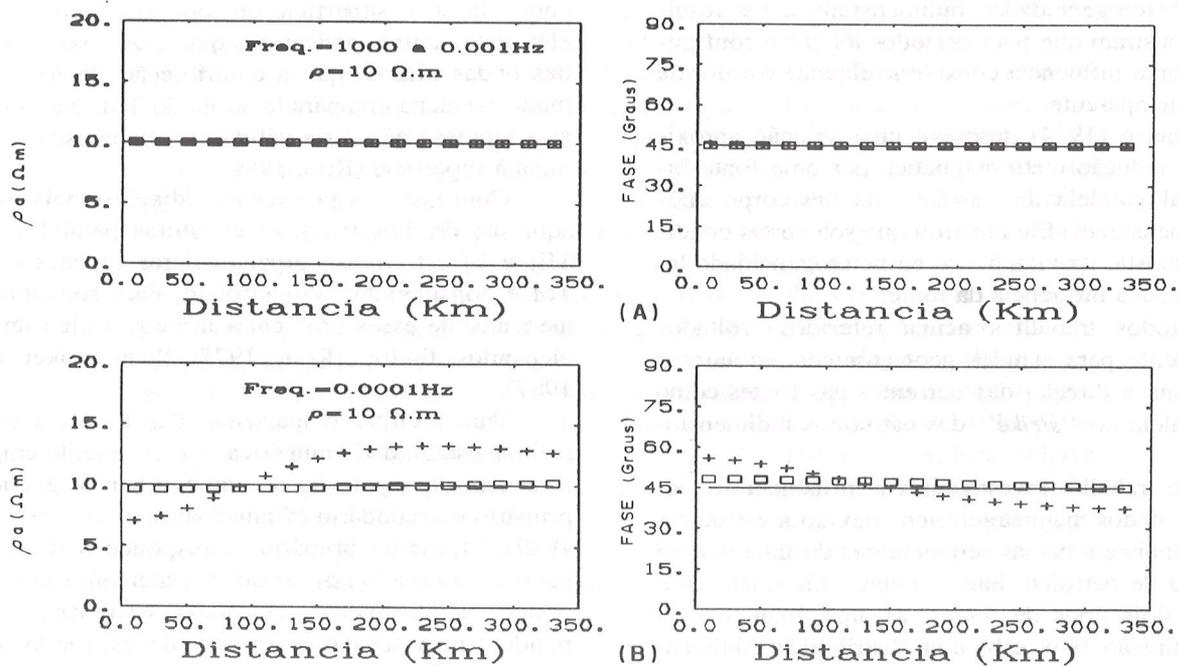


Figura 1. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato num semi-espaco de $10 \Omega \cdot m$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 1. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a $10 \Omega \cdot m$ semi-space. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

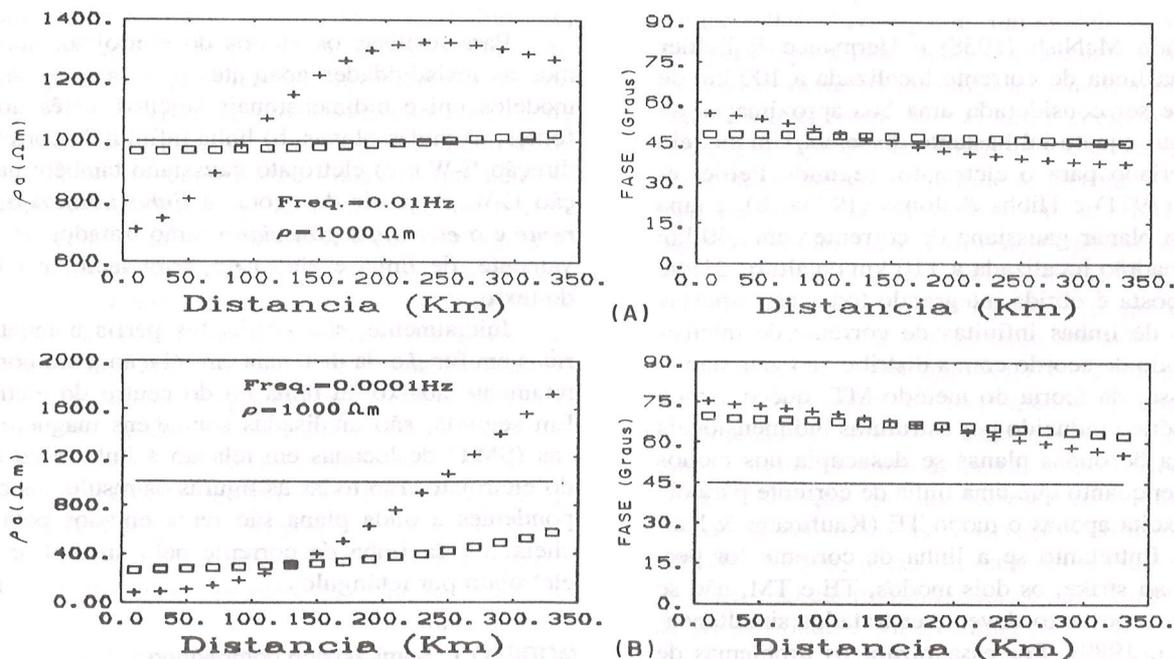


Figura 2. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato num semi-espaco de $1000 \Omega \cdot m$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 2. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a $1000 \Omega \cdot m$ semi-space. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

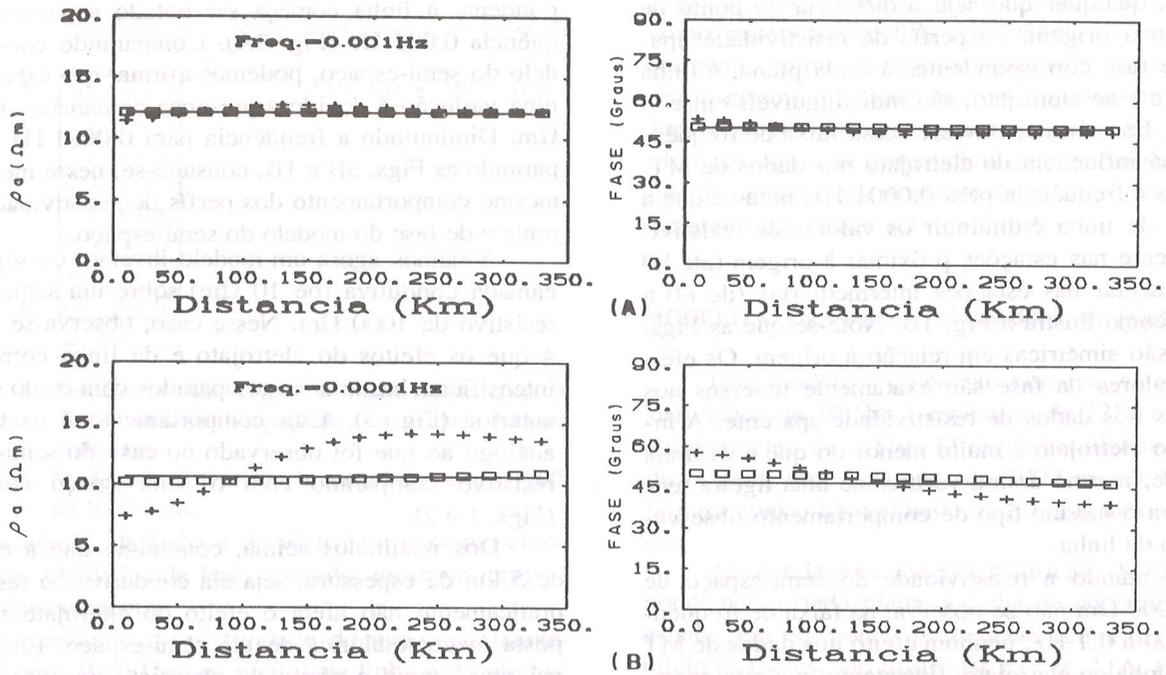


Figura 3. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojoato num meio de duas camadas ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h = 5 \text{ km}$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). -- onda plana, ++ linha de corrente, [] [] eletrojoato.

Figure 3. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a two layered-earth ($\rho_1 = 1000 \Omega m$, $h = 5 \text{ km}$, $\rho_2 = 10 \Omega m$). -- plane wave, ++ line source, [] [] electrojet.

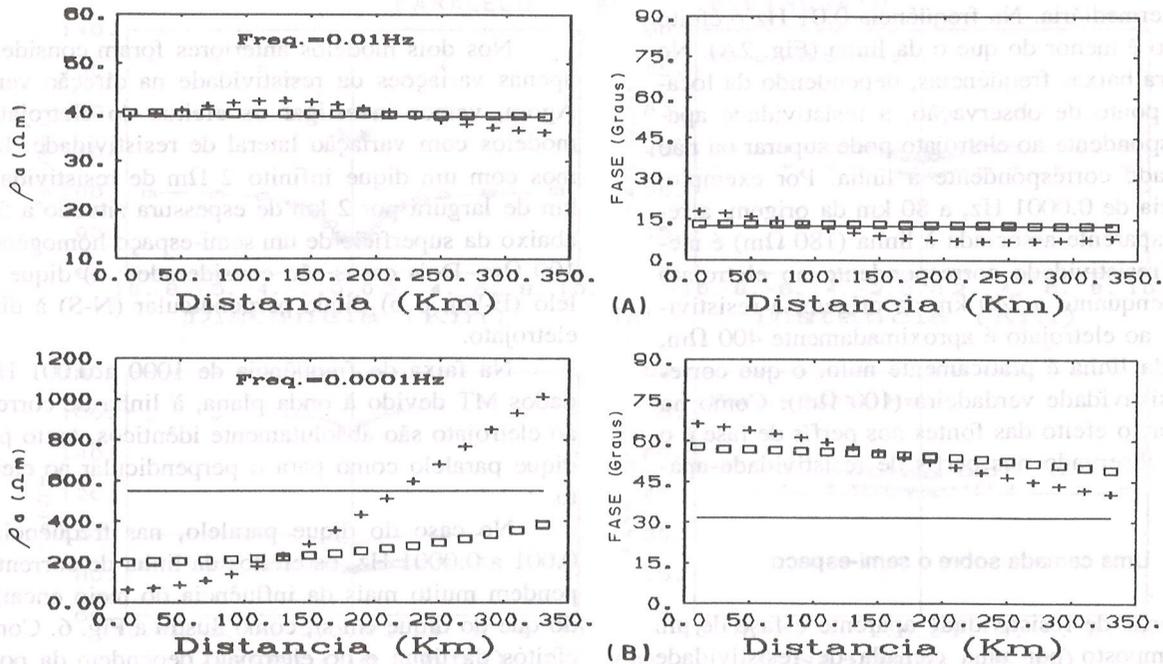


Figura 4. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojoato num meio de duas camadas ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h = 5 \text{ km}$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$). -- onda plana, ++ linha de corrente, [] [] eletrojoato.

Figure 4. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a two layered-earth ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $h = 5 \text{ km}$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$). -- plane wave, ++ line source, [] [] electrojet.

0.001 Hz, qualquer que seja a distância do ponto de observação à origem, os perfis de resistividade aparente e de fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato, são indistinguíveis entre si (Fig. 1A). Em outras palavras, nessa faixa de frequência, não há influência do eletrojato nos dados de MT. Reduzindo a frequência para 0.0001 Hz, nota-se que a influência da linha é diminuir os valores de resistividade aparente nas estações próximas à origem (até 80 km) e aumentar nas estações intermediárias (de 80 a 350 km), como ilustra a Fig. 1B. Note-se que as Figs. 1A e 1B são simétricas em relação à origem. Os efeitos nos valores da fase são exatamente inversos aos observados nos dados de resistividade aparente. A influência do eletrojato é muito menor do que a da linha de corrente, mesmo assim, verifica-se uma ligeira tendência para o mesmo tipo de comportamento observado no caso da linha.

Aumentando a resistividade do semi-espaço de 10 para 1000 Ωm não se observa, na faixa de frequência de 1000 a 0.1 Hz, nenhum efeito nos dados de MT devido à linha ou eletrojato. Entretanto, o efeito começa a ser notado a partir da frequência de 0.01 Hz e intensifica-se bastante, nas frequências 0.001 e 0.0001 Hz, como ilustram as Figs. 2A e 2B. Nota-se o mesmo comportamento observado no caso anterior, isto é, valores de resistividade aparente abaixo do valor verdadeiro na parte central do perfil e valores superiores na parte intermediária. Na frequência 0.01 Hz o efeito do eletrojato é menor do que o da linha (Fig. 2A). No entanto, para baixas frequências, dependendo da localização do ponto de observação, a resistividade aparente correspondente ao eletrojato pode superar ou não a resistividade correspondente à linha. Por exemplo, na frequência de 0.0001 Hz, a 80 km da origem, a resistividade aparente associada à linha (180 Ωm) é menor que a resistividade correspondente ao eletrojato (300 Ωm), enquanto a 240 km da origem, a resistividade ligada ao eletrojato é aproximadamente 400 Ωm , e o efeito da linha é praticamente nulo, o que corresponde à resistividade verdadeira (100 Ωm). Como no caso anterior, o efeito das fontes nos perfis de fase é o inverso do observado nos perfis de resistividade aparente.

MODELO 2. Uma camada sobre o semi-espaço

Os perfis de resistividade aparente e fase de um modelo composto por uma camada de resistividade 1000 Ωm e espessura 5 km sobre um embasamento de resistividade 10 Ωm estão ilustrados na Fig. 3. No intervalo de frequência de 1000 a 0.001 Hz, os perfis correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato são absolutamente idênticos. Uma diminuta divergência do perfil de resistividade aparente corres-

pondente à linha começa ser notado a partir da frequência 0.001 Hz (Fig. 3A). Comparando com o modelo do semi-espaço, podemos afirmar que esta pequena variação é devido a presença da camada de 1000 Ωm . Diminuindo a frequência para 0.0001 Hz e comparando as Figs. 3B e 1B, constata-se, nesse modelo, o mesmo comportamento dos perfis de resistividade aparente e de fase do modelo do semi-espaço.

Vejam agora um modelo inverso, ou seja, uma camada condutiva (de 10 Ωm) sobre um semi-espaço resistivo de 1000 Ωm . Nesse caso, observa-se na Fig. 4 que os efeitos do eletrojato e da linha corrente se intensificam bastante se comparados com os do modelo anterior (Fig. 3). Este comportamento é exatamente análogo ao que foi observado no caso do semi-espaço resistivo comparado com o semi-espaço condutivo (Figs. 1 e 2).

Dos resultados acima, conclui-se que a camada de 5 km de espessura, seja ela condutiva ou resistiva, praticamente não afeta o efeito do eletrojato na resposta magnetotelúrica de um semi-espaço. Em outras palavras, como o efeito do eletrojato age nas baixas frequências, a influência de camadas superficiais é muito pequena, e conseqüentemente, é o embasamento que tem maior influência. Ademais, o efeito é tanto maior quanto mais resistivo for o embasamento.

MODELO 3. Dique condutivo num meio resistivo

Nos dois modelos anteriores foram considerados apenas variações da resistividade na direção vertical. Agora, vamos investigar os efeitos do eletrojato em modelos com variação lateral de resistividade. Iniciamos com um dique infinito 2 Ωm de resistividade, 1 km de largura por 2 km de espessura situado a 500 m abaixo da superfície de um semi-espaço homogêneo de 100 Ωm . Dois casos são considerados: a) dique paralelo (E-W), e b) dique perpendicular (N-S) à direção do eletrojato.

Na faixa de frequência de 1000 a 0.001 Hz, os dados MT devido à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato são absolutamente idênticos, tanto para o dique paralelo como para o perpendicular ao eletrojato.

No caso do dique paralelo, nas frequências de 0.001 a 0.0001 Hz, os efeitos da linha de corrente dependem muito mais da influência do meio encaixante do que do dique em si, como ilustra a Fig. 6. Como os efeitos da linha e do eletrojato dependem da posição da estação de observação em relação à origem, nota-se um deslocamento global da resposta do dique em função do efeito provocado pelo semi-espaço.

No caso do dique perpendicular, observa-se o mesmo deslocamento na resistividade aparente na vizinhança do dique, porém, ao contrário do dique para-

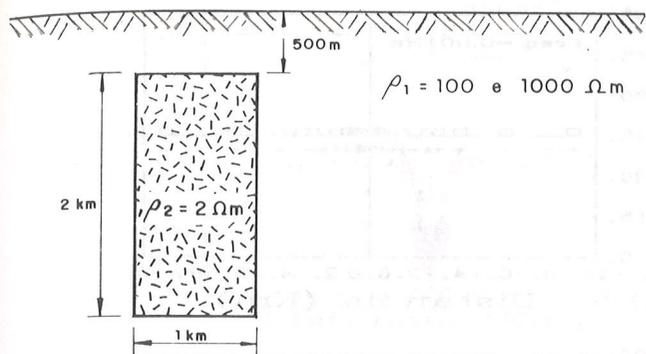


Figura 5. Modelo de um dique de resistividade igual a 2 Ωm num semi-espaco de resistividade 100 ou 1000 Ωm.

Figure 5. Model of a 2 Ωm dike in a semi-space ($\rho = 100$ ou 1000 Ωm).

lelo, os efeitos da linha e do eletrojato cessam acima do dique. Os dados de fase, contudo, mostram um pequeno deslocamento.

Aumentando a resistividade do meio encaixante de 100 para 1000 Ωm, os efeitos da linha e do eletrojato se intensificam, como pode ser observado comparando as Figs. 8 e 9 com as Figs. 6 e 7. No caso do dique paralelo (Fig. 8), observa-se claramente o posicionamento dos perfis de resistividade e de fase de acordo com o deslocamento causado pelo meio encaixante

(Fig. 1). Por exemplo, na frequência de 0.0001 Hz, como mostra a Fig. 8B, a influência da linha é muito pequena, enquanto que a influência do eletrojato é muito grande, exatamente como previsto no gráfico da Fig. 1 na posição correspondente a 240 km da origem. No caso do dique perpendicular, observa-se nos gráficos de resistividade aparente da Fig. 9, o cancelamento do efeito das fontes sobre o dique.

MODELO 4. Dique num meio de duas camadas

Este modelo é composto por uma camada de resistividade de 10 Ωm e espessura de 2250 m sobre um embasamento de 1 Ωm. O dique localizado a 240 km da origem, tem espessura de 1000 m por 1000 m de largura com o topo situado a 250 m abaixo da superfície.

As sondagens magnetotélúricas (SMT) correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato, em um ponto diretamente acima do dique paralelo às fontes, são ilustradas na Fig. 11A. Em virtude do caráter condutivo do embasamento, as três sondagens são praticamente idênticas, com exceção de alguns poucos pontos no gráfico da fase nas baixas frequências.

Entretanto, se a resistividade do embasamento

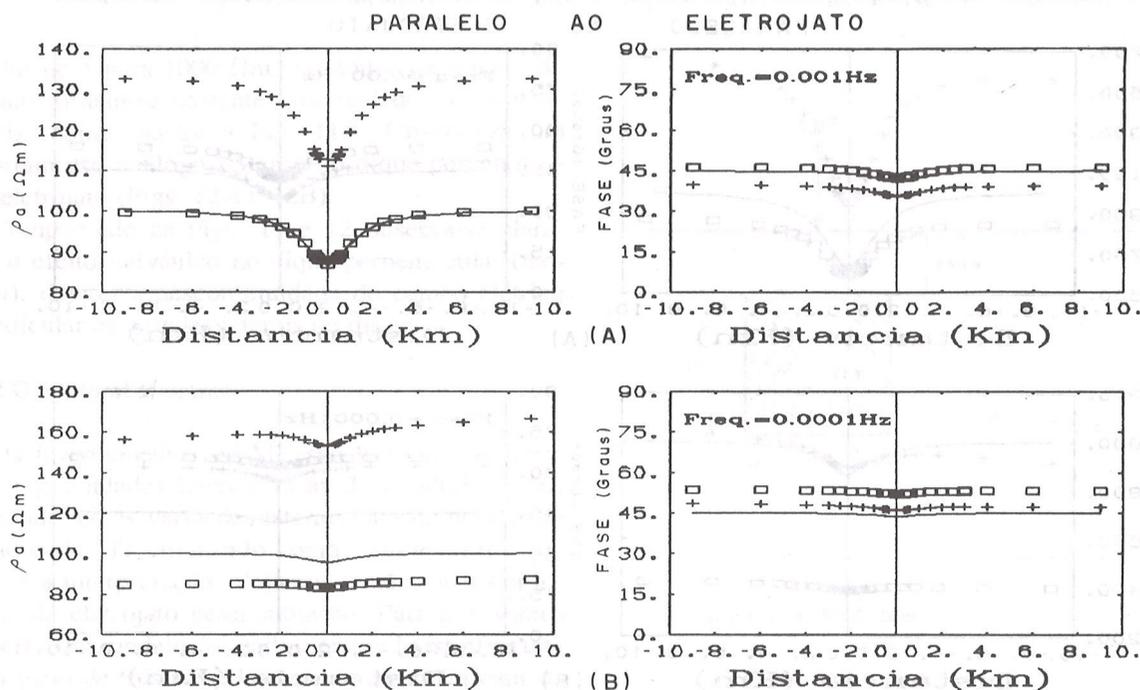


Figura 6. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um dique (2 Ωm) num semi-espaco (100 Ωm) paralelo ao eletrojato. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 6. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a dike in a 100 Ωm semi-space, parallel to the electrojet. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

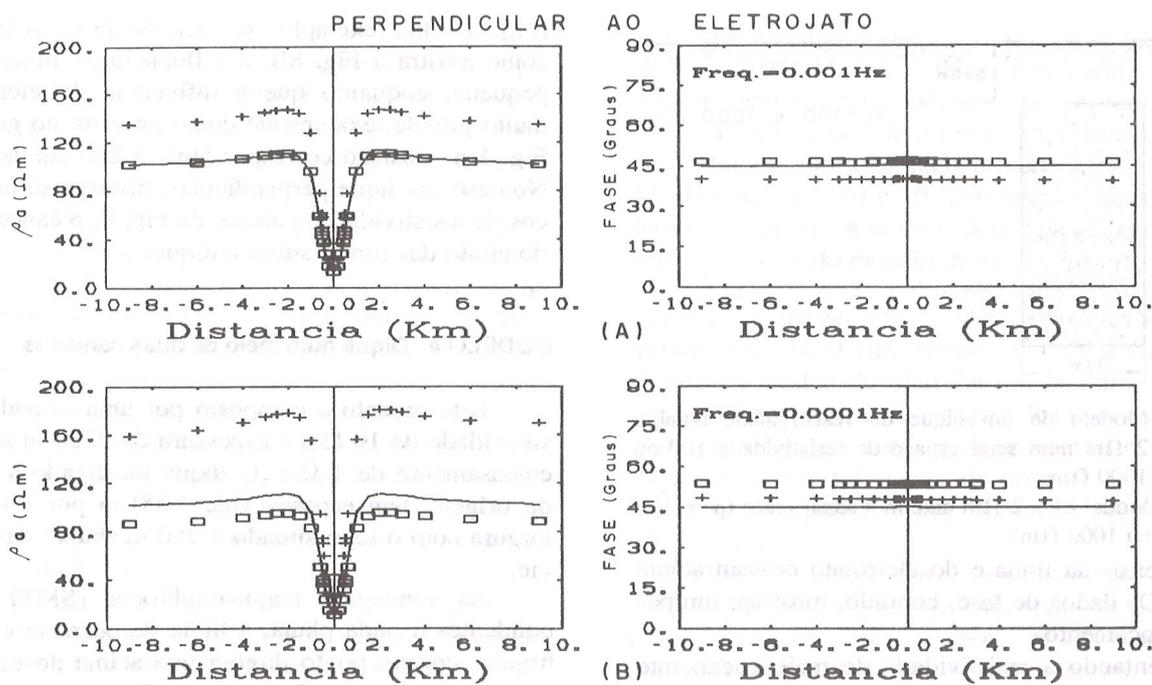


Figura 7. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um dique ($2 \Omega m$) num semi-espaco ($100 \Omega m$) perpendicular ao eletrojato. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 7. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a dike in a $100 \Omega m$ semi-espaco, perpendicular to the electrojet. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

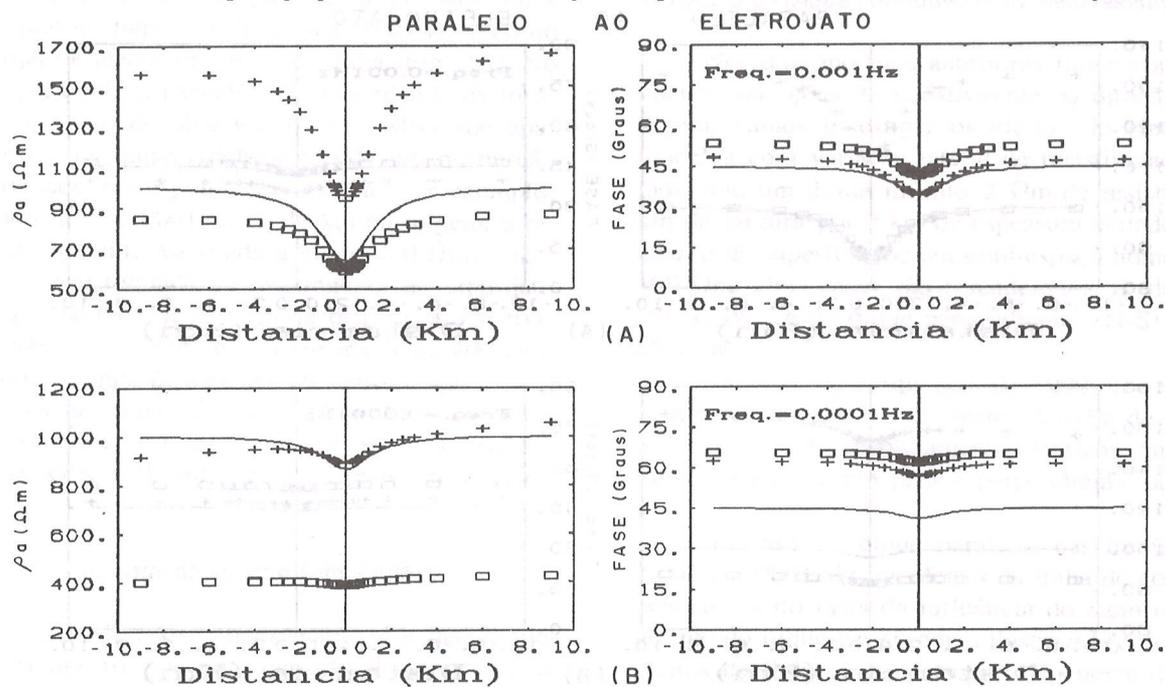


Figura 8. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um dique ($2 \Omega m$) num semi-espaco ($1000 \Omega m$) paralelo ao eletrojato. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 8. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a dike in a $1000 \Omega m$ semi-espaco, parallel to the electrojet. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

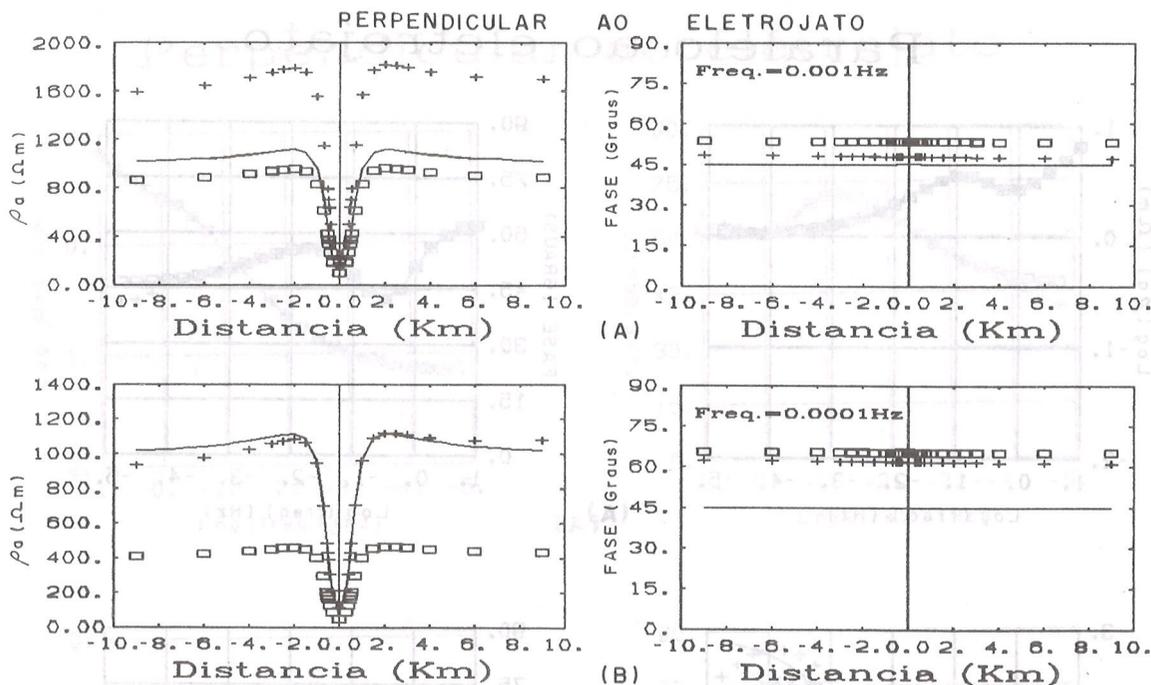


Figura 9. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um dique (2 Ωm) num semi-espaco (1000 Ωm) perpendicular ao eletrojato. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 9. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a dike in a 100 Ωm semi-espaco, perpendicular to the electrojet. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

aumentar de 1 para 1000 Ωm, os efeitos da linha e do eletrojato tornam-se bastante pronunciados a partir de 0.01 Hz, como mostra a Fig. 11B. Observa-se um comportamento análogo no caso do dique perpendicular ao eletrojato (Figs. 12A e 12B).

Comparando as Figs. 11 e 12 observa-se claramente o efeito galvânico no dique perpendicular (modo TM), devido a descontinuidade do campo elétrico perpendicular às paredes laterais do dique.

MODELO 5. Horst aflorante

Os levantamentos de MT são bastante sensíveis às heterogeneidades laterais rasas de condutividades. Na verdade, essas variações laterais causam um desvio nos dados de MT conhecido como "static shift" que complica a interpretação. Vejamos, então, qual é a influência do eletrojato nessa situação. Para isso vamos considerar um modelo formado por um horst aflorante em um meio de três camadas, onde a primeira camada tem 2 km de espessura e resistividade de 1000 ou 10 Ωm, a segunda camada, 28 km de espessura e resistividade do embasamento 10 ou 1000 Ωm. O horst com 20 km de comprimento tem o seu centro a 240 km do ponto verticalmente abaixo da linha ou centro do eletrojato. Para enfatizar o efeito "static shift" escolhe-

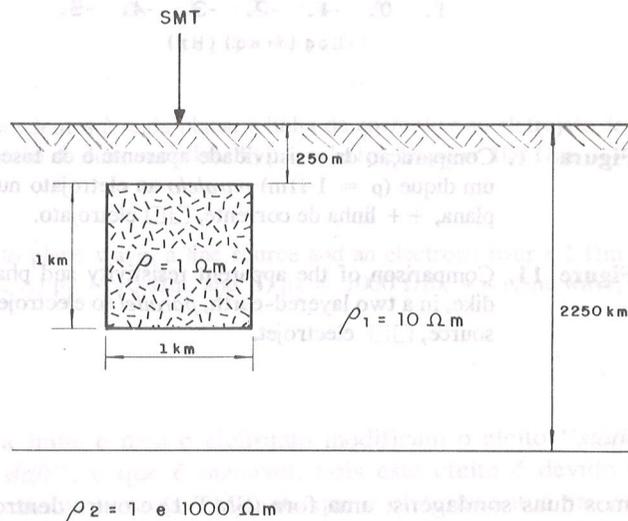


Figura 10. Modelo de um dique de resistividade igual a 1 Ωm num meio de duas camadas (ρ1 = 10 Ωm, h = 2250 m, ρ2 = 1 ou 1000 Ωm).

Figure 10. Model of a 1 Ωm dike in a two layered-earth (ρ1 = 10 Ωm, h = 2250 m, ρ2 = 1, 1000 Ωm).

Paralelo ao eletrojato

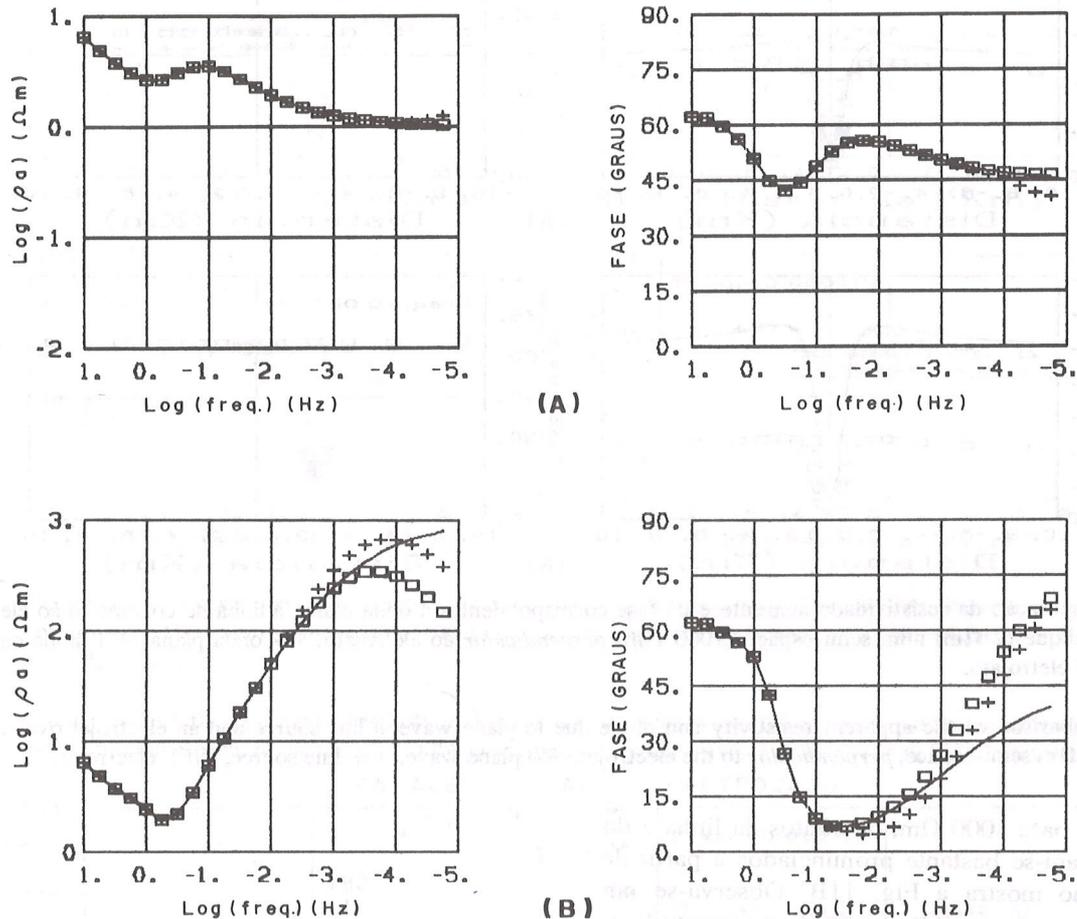


Figura 11. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um dique ($\rho = 1 \Omega\text{m}$) paralelo ao eletrojato num meio de duas camadas. A) $\rho_2 = 1 \Omega\text{m}$, B) $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 11. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a $1 \Omega\text{m}$ dike, in a two layered-earth, parallel to electrojet. A) $\rho_2 = 10 \Omega\text{m}$, and B) $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

mos duas sondagens; uma fora (SMT-1) e outra dentro (SMT-2) do horst.

A exemplo dos modelos anteriores, vamos considerar dois casos: a) o horst paralelo e b) horst perpendicular ao eletrojato. Inicialmente, vamos supor a segunda camada como sendo resistiva ($1000 \Omega\text{m}$), o embasamento condutivo ($10 \Omega\text{m}$) e o horst paralelo ao eletrojato. A influência da linha e do eletrojato nas sondagens SMT-1 e SMT-2 é praticamente nula, em

todas as frequências, como mostra as Figs. 14 e 16A. No caso do horst perpendicular, a influência das fontes nas sondagens, embora pequena, é claramente observada nas frequências compreendidas entre 0.01 e 0.0001 Hz (Figs. 15A e 17A).

Ao contrário do caso anterior, nota-se, nas baixas frequências (0.01 a 0.0001 Hz), um aumento apreciável dos efeitos da linha e do eletrojato nas SMT-1 e SMT-2 quando a segunda camada passa de resistiva

Perpendicular ao eletrojato

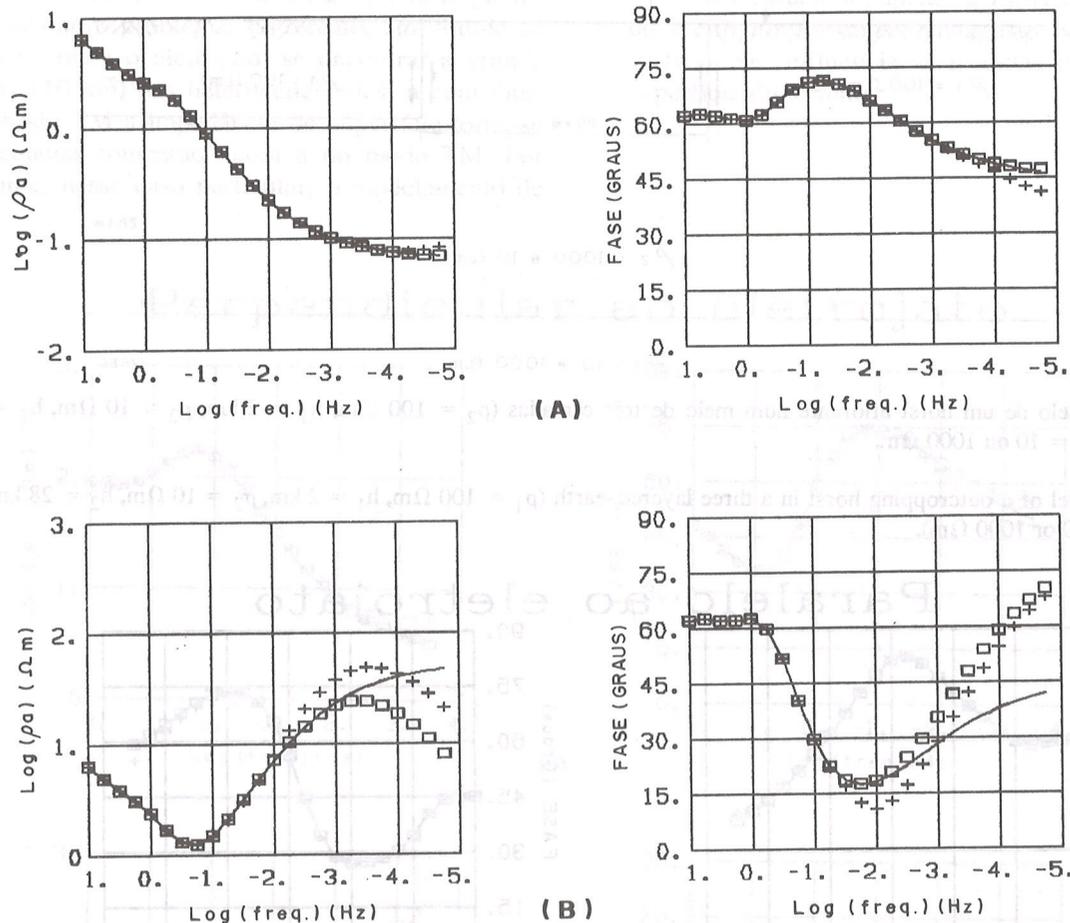


Figura 12. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um dique ($\rho = 1 \Omega m$) perpendicular ao eletrojato num meio de duas camadas. A) $\rho_2 = 1 \Omega m$, B) $\rho_2 = 100 \Omega m$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 12. Comparison of the apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a $1 \Omega m$ dike, in a two layered-earth, perpendicular to electrojet. A) $\rho_2 = 10 \Omega m$, and B) $\rho_2 = 1000 \Omega m$. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

($1000 \Omega m$) para condutiva ($10 \Omega m$) e o embasamento de condutivo ($10 \Omega m$) para resistivo ($1000 \Omega m$) (Figs. 14B e 16B). Ademais, os efeitos são mais proeminentes no horst perpendicular do que no horst paralelo ao eletrojato (Figs. 15B e 17B). Nota-se também que os efeitos são mais internos nos gráficos de fase do que nos de resistividade aparente.

Comparando as Figs. 19 com 21 e 20 com 22, observa-se claramente o efeito "static shift", evidenciado pelo deslocamento dos gráficos SMT-2 com relação aos da SMT-1. É interessante observar que nem

a linha e nem o eletrojato modificam o efeito "static shift", o que é razoável, pois este efeito é devido a estruturas rasas, enquanto que o eletrojato atua nas estruturas profundas.

JUSTIFICATIVAS DO MODELO

A simulação numérica da impedância de superfície devido a estruturas bidimensionais com uma linha

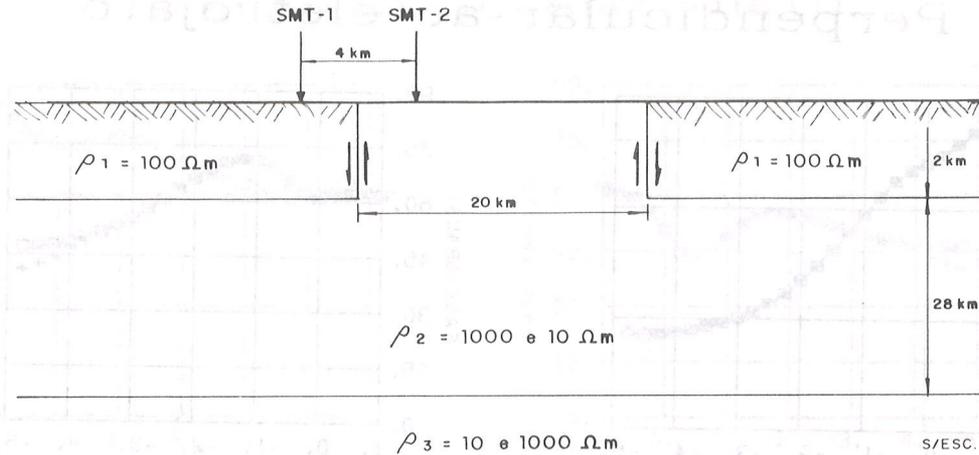


Figura 13. Modelo de um horst aflorante num meio de três camadas ($\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 2 \text{ km}$, $\rho_2 = 10 \Omega\text{m}$, $h_2 = 28 \text{ km}$ e $\rho_3 = 10$ ou $1000 \Omega\text{m}$).

Figure 13. Model of a outcropping horst in a three layered-earth ($\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$, $h_1 = 2 \text{ km}$, $\rho_2 = 10 \Omega\text{m}$, $h_2 = 28 \text{ km}$ and $\rho_3 = 10$ or $1000 \Omega\text{m}$).

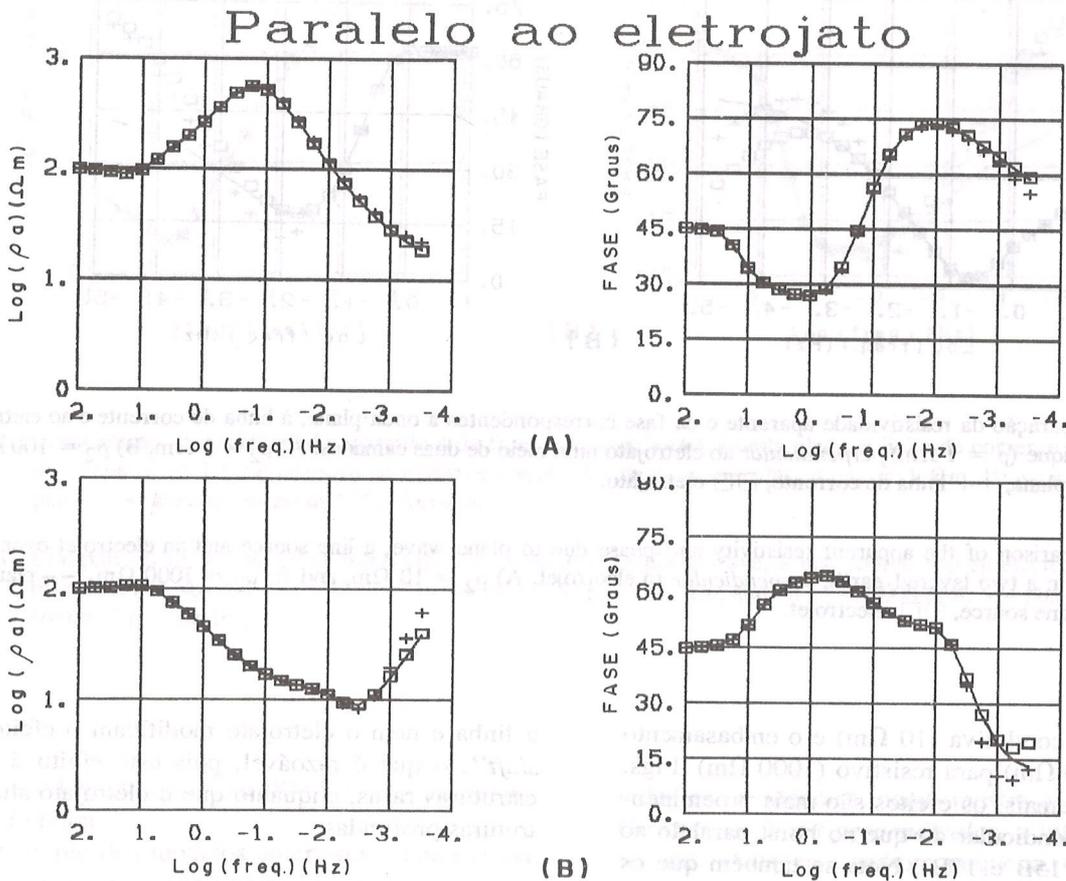


Figura 14. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um horst aflorante *paralelo* ao eletrojato. SMT-1, a) $\rho_2 = 1000$, $\rho_3 = 10 \Omega\text{m}$, b) $\rho_2 = 10$, $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 14. Comparison of the SMT-1 apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a outcropping horst, in a three layered-earth, *parallel* to the electrojet. A) $\rho_2 = 1000$, $\rho_3 = 10 \Omega\text{m}$, B) $\rho_2 = 10$, $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

de corrente paralela ao strike é bastante simples. O mesmo não acontece quando a linha de corrente é perpendicular ao strike. Nesse caso, ao contrário do anterior, os modos TE e TM não se desacoplam, o que dificulta bastante o problema. Entretanto, em virtude da linha, que simula o eletrojato, se encontrar a grande distância (110 km) das heterogeneidades, a contribuição do modo TM à impedância de superfície torna-se muito pequena comparada com a do modo TM. Por conseguinte, nesse caso particular, o modelamento de

estruturas paralelas e perpendiculares ao eletrojato, do ponto de vista computacional, é praticamente o mesmo.

Nesse trabalho, apenas a variação horizontal E-W do eletrojato foi considerada, isto porque a variação vertical não influencia as medidas de impedância na superfície do terreno.

Perpendicular ao eletrojato

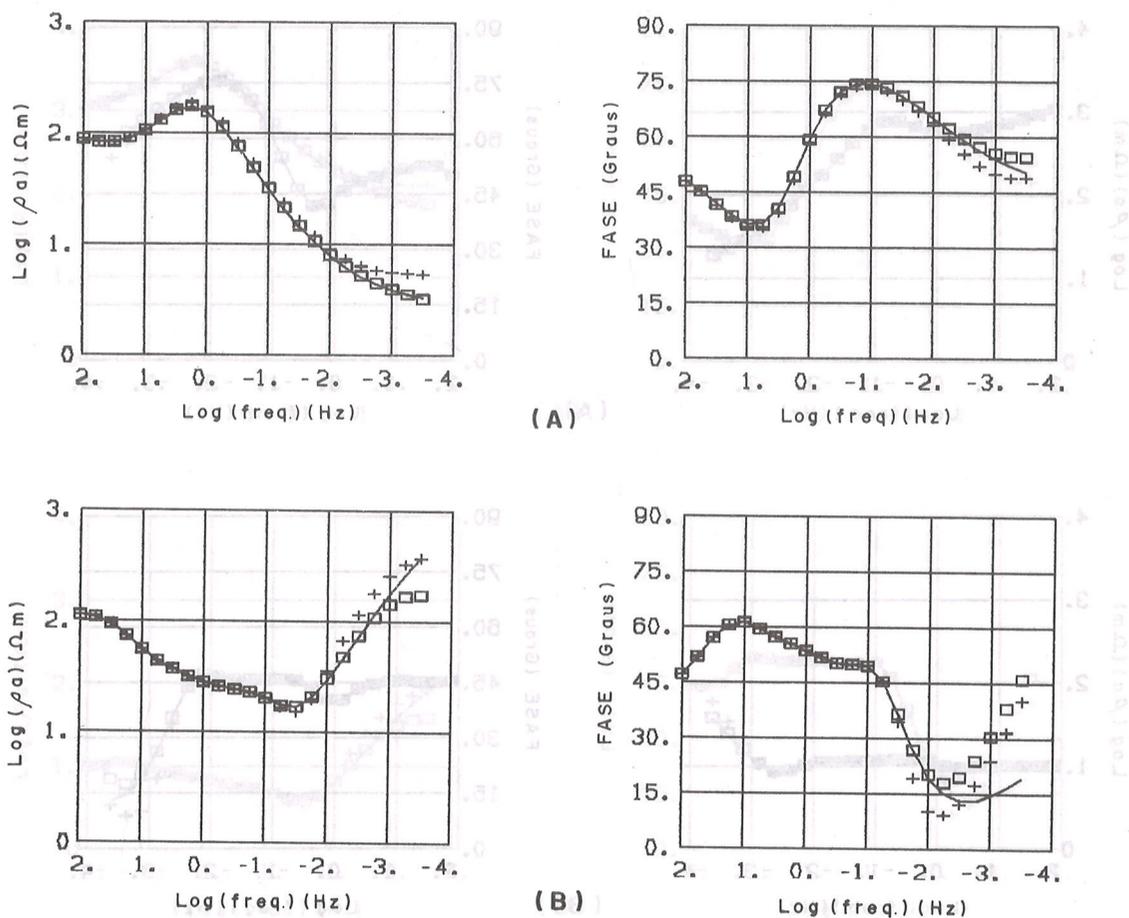


Figura 15. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um horst aflorante perpendicular ao eletrojato. SMT-1, a) $\rho_2 = 1000, \rho_3 = 10 \Omega m$, b) $\rho_2 = 10, \rho_3 = 1000 \Omega m$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 15. Comparison of the SMT-1 apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a outcropping horst, in a three layered-earth, perpendicular to the electrojet. A) $\rho_2 = 1000, \rho_3 = 10 \Omega m$, B) $\rho_2 = 10, \rho_3 = 1000 \Omega m$. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados dos modelos acima analisados, conclui-se que os efeitos do eletrojato nas respostas MT de estruturas 2D têm os seguintes aspectos:

- Efeitos em relação a distância à fonte

Para meios unidimensionais (semi-espaço e es-

tratificado) os valores de resistividade aparente e fase dependem da posição do ponto de observação em relação à fonte. Nas estações localizadas próximas ao ponto diretamente abaixo da linha ou do centro do eletrojato os efeitos correspondem a uma diminuição dos valores de resistividade aparente e um aumento dos valores da fase com relação aos da onda plana. A medida que o ponto de observação se distancia do centro, os valores de resistividade aparente aumentam gradativamente, ultrapassando o valor referente à onda

Paralelo ao eletrojato

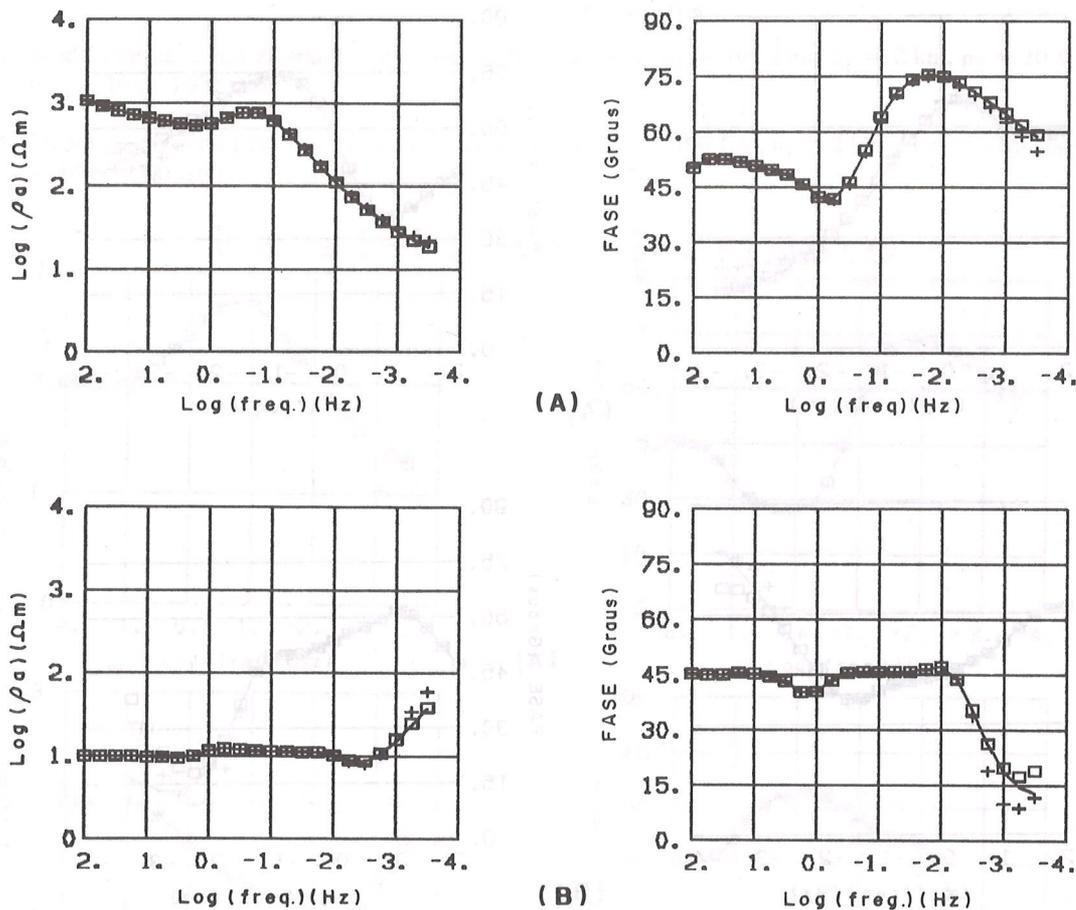


Figura 16. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um horst aflorante paralelo ao eletrojato. SMT-2, a) $\rho_2 = 1000, \rho_3 = 10 \Omega m$, b) $\rho_2 = 10, \rho_3 = 1000 \Omega m$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 16. Comparison of the SMT-2 apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a outcropping horst, in a three layered-earth, parallel to the electrojet. A) $\rho_2 = 1000, \rho_3 = 10 \Omega m$, B) $\rho_2 = 10, \rho_3 = 1000 \Omega m$. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

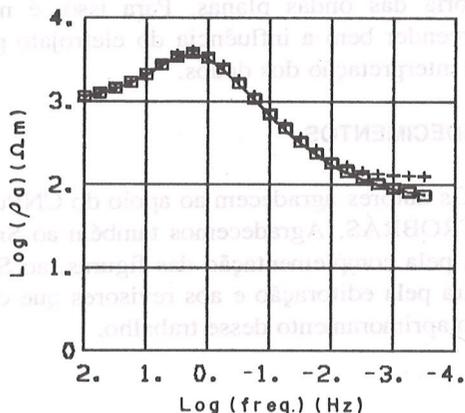
plana, para, mais adiante, diminuir novamente até alcançar o valor constante de resistividade correspondente à onda plana. Os efeitos nos dados da fase são, exatamente, inverso aos observados nos dados de resistividade aparente.

- Efeitos em relação a frequência

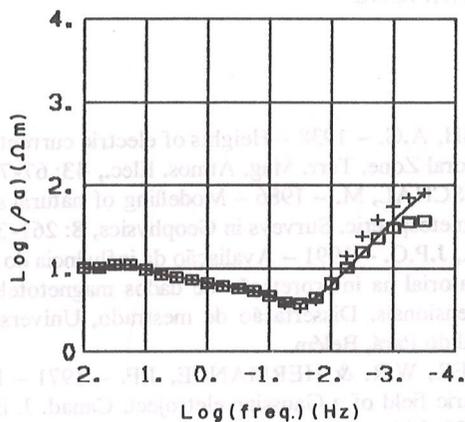
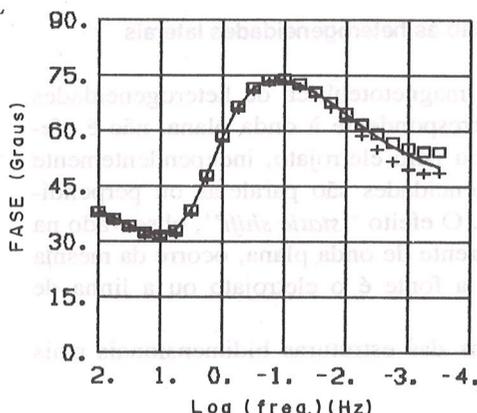
Para valores de frequências altas (1000 a 0.01 Hz, levando em conta os valores de resistividade das

formações geológicas) é praticamente indistinguível a resistividade aparente e fase dos três tipos de fontes; onda plana, linha infinita de corrente e distribuição gaussiana (eletrojato). A redução das frequências (0.01 a 0.0001 Hz) provoca divergência entre os resultados da linha e do eletrojato com relação ao da onda plana. Essas divergências dependem, com já vimos, da posição do ponto de observação em relação ao centro do eletrojato (ou da linha). Por isso, os efeitos devido ao eletrojato podem ser maiores ou menores do que

Perpendicular ao eletrojato



(A)



(B)

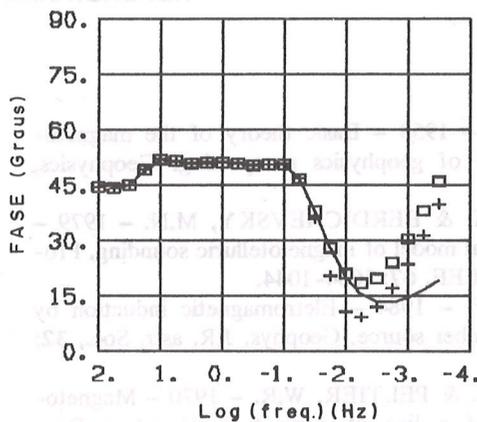


Figura 17. Comparação da resistividade aparente e da fase correspondentes à onda plana, à linha de corrente e ao eletrojato de um horst aflorante perpendicular ao eletrojato. SMT-2, a) $\rho_2 = 1000, \rho_3 = 10 \Omega m$, b) $\rho_2 = 10, \rho_3 = 1000 \Omega m$. -- onda plana, ++ linha de corrente, □□ eletrojato.

Figure 17. Comparison of the SMT-2 apparent resistivity and phase due to plane wave, a line source and an electrojet over a outcropping horst, in a three layered-earth, perpendicular to the electrojet. A) $\rho_2 = 1000, \rho_3 = 10 \Omega m$, B) $\rho_2 = 10, \rho_3 = 1000 \Omega m$. -- plane wave, ++ line source, □□ electrojet.

aqueles devido à linha.

- Efeitos em relação a resistividade do meio

A intensidade dos efeitos das fontes cresce com a resistividade do meio, ou seja, meios mais resistivos correspondem a maior intensidade dos efeitos, e portanto, maior divergência entre os valores de resistividade aparente e fase do eletrojato e da linha com relação aos da onda plana. Para meios estratificados, a intensidade dos efeitos depende principalmente das camadas mais profundas, isto porque os efeitos só são observados nas baixas frequências, como já enfatizamos.

- Efeitos em relação às heterogeneidades laterais

A resposta magnetotélúrica de heterogeneidades laterais rasas correspondente à onda plana, não é afetada pela linha ou pelo eletrojato, independentemente se essas heterogeneidades são paralelas ou perpendiculares às fontes. O efeito "static shift", observado na resistividade aparente de onda plana, ocorre da mesma maneira quando a fonte é o eletrojato ou a linha de corrente.

As respostas das estruturas bidimensionais mais

profundas paralelas ao eletrojato e à linha, são marcadamente afetados pela resposta do meio encaixante, que por sua vez, depende da distância às fontes. Em outras palavras, os efeitos das ondas nas respostas de estruturas profundas paralelas dependem essencialmente da localização dessas estruturas em relação à linha ou ao eletrojato. Os efeitos das fontes nas estruturas perpendiculares também são marcadamente influenciados pelo meio encaixante, contudo, ao contrário do caso anterior, os efeitos desaparecem totalmente nas observações feitas acima das estruturas.

Em suma, os efeitos devido ao eletrojato equatorial nos dados de MT de estruturas bidimensionais pode, em muitos casos, dificultar a interpretação baseada na teoria das ondas planas. Para isso, é necessário compreender bem a influência do eletrojato para facilitar a interpretação dos dados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CNPq, FINEP e PETROBRÁS. Agradecemos também ao Sr. Ronald Vieira pela complementação das figuras, ao Sr. André Oliveira pela editoração e aos revisores que contribuíram no aprimoramento desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAGNIARD, L. - 1953 - Basic theory of the magnetotelluric method of geophysics prospecting. *Geophysics*, **18**: 605-635.
- DEMITRIEV, V.I. & BERDICHEVSKY, M.N. - 1979 - The fundamental model of magnetotelluric sounding. *Proceeding of the IEEE*, **67**: 1034-1044.
- HERMANCE, J.F. - 1984 - Eletromagnetic induction by finite wave-number source. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, **32**: 269-277.
- HERMANCE, J.F. & PELTIER, W.R. - 1970 - Magnetotelluric field of a line of current. *J. Geophys. Res.*, **73**: 3351-3355.
- HIBBS, R.D. & JONES, F.W. - 1973a - Eletromagnetic induction in the Earth by a symmetric non-uniform source. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, **32**: 269-277.
- HIBBS, R.D. & JONES, F.W. - 1973b - Eletromagnetic induction in the Earth by a non-symmetric non-uniform source. *J. Geomag. Geoelectric.*, **25**: 75-86.
- KAUFMANN, A.A. & KELLER, G.V. - 1981 - The magnetotelluric sounding method. Elsevier, Amsterdam, 595 p.
- MADDEN, T. & NELSON, P. - 1965 - A defense of Cagniard's magnetotelluric method. (Vozoff K., ed.), *Geophysics reprint series*, 89-102.
- McNISH, A.G. - 1938 - Heights of electric currents near the Auroral Zone. *Terr. Mag. Atmos. Elec.*, **43**: 67-75.
- MARESCHAL, M. - 1986 - Modelling of natural sources of magnetospheric. *Surveys in Geophysics*, **8**: 261-300.
- MOTA, J.P.O. - 1991 - Avaliação da influência do eletrojato equatorial na interpretação de dados magnetotélúricos bidimensionais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém.
- PELTIER, W.R. & HERMANCE, J.F. - 1971 - Magnetotelluric field of a Gaussian electroject. *Canad. J. Earth Sci.*, **8**: 338-346.
- PRICE, A.T. - 1962 - The theory of magnetotelluric methods when the source field is considered. *J. Geophys. Res.*, **67**: 1907-1918.
- RIJO, L. - 1977 - Modelling of electric and electromagnetic data. Ph.D. Thesis, Salt Lake City, University of Utah, 242p.
- RIJO, L. - 1989 - Teoria dos métodos elétricos e eletromagnéticos I e II. Notas de aulas do curso de Pós-Graduação em Geofísica, CG/UFPa.
- THIKHONOV, A.N. - 1950 - On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust in magnetotellurics methods. *Geophysics reprints series*,

PROSPECCÃO GEOELÉCTRICA EM ZONAS COSTEIRAS

5: 2-3, ed. by K. Vozoff, SEG, 1985.

TRIVEDI, N.B. - 1989 - The equatorial electrojet and its implication in geophysical prospecting. Proceeding of the 1st Congress of the Brazilian Geophysical Society.

WANNAMAKER, P.E.; STODT, J.A. & RIJO, L. - 1987 - A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modelling. Geophys. J.R. astr. Soc., **88**:

277-296.

WAIT, J.R. - 1962 - Theory of magnetotelluric fields. J. Res. NBS, 66D, 509-541.

Versão recebida em: 08/02/91

Versão revista e aceita em: 08/08/91

Editor Associado: V.W.J.H. Kirchoff

salgada, na determinação de poço, na delimitação das zonas aquíferas, na localização e no estabelecimento da topografia do substrato impermeável do aquífero freático existente na duna de Monte Cristo Vila Real de Santo António.

O trabalho de campo de prospecção geofísica consistiu de 129 sondagens eléctricas verticais do tipo Schlumberger (S.E.V.), localizadas em perfis perpendiculares à linha de costa.

A interpretação das curvas de resistividade aparente das S.E.V. fez-se por um ajustamento de mínimos quadrados entre as transformadas tétrica e de campo da resistividade, usando o método do máximo gradiente descendente.

Os resultados da interpretação obtidos a partir das S.E.V. foram correlacionados com sondagens mecânicas, apresentando uma forte correlação com a litologia da zona próxima do litoral algarvio.

THE RESISTIVITY METHOD IN COASTAL ZONES - The stability method was used in the derivation of the apparent resistivity tensor and in the localization of electrically polarized zones, in the study of the topography and nature of the impermeable substratum of the aquifer under study, in the dunes of Monte Cristo Vila Real de Santo António.

129 vertical electrical soundings (V.E.S.) were carried out on lines perpendicular to the coast line.

The interpretation of the V.E.S. was performed by a least square adjustment between the field resistivity transform and the resistivity transform obtained from a model guessed "a priori", using the steepest descent method.

The results obtained from the V.E.S. interpretation are strongly correlated with the mechanical soundings in this zone of the Algarve seashore.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação do método de resistividade ao estudo de aquíferos tem sido utilizada com sucesso em diversas regiões.

Neste trabalho usou-se o método numa zona costeira, onde o aquífero se encontra numa fraccção desta em espessura não ultrapassa 15 metros, subjacente à qual existe uma camada constituida essencialmente por lodos ou argilas, que constituem o substrato impermeável.

Este problema foi abordado por vários autores, que usaram sobretudo o dispositivo de Schlumberger. Assim, Mendes Vieira (1966) efectuou o estudo do aquífero do planalto dos Cajuchos em Ponta Amélia (Moçambique), tendo estabelecido a topografia do

substrato impermeável e localizado a interface água doce-água salgada. Koefoed (1979) apresenta um estudo efectuado na região oeste de Holanda, onde numa formação arenosa, foi localizada a zona de transição entre a água doce e a água salgada sendo a interpretação das curvas de resistividade aparente efectuada nos pontos localizados mais complexos, obtidos pelo ajustamento entre as resistividades de campo e tétrica, usando o método do máximo gradiente descendente.

No presente trabalho, o ajustamento fez-se entre as transformadas tétrica e de campo da resistividade, usando um método clássico.

Este estudo visa sobretudo a determinação da posição, da geometria do substrato impermeável, a localização da interface água doce-água salgada e a