

1. Publicação nº <i>INPE-3736-PRE/866</i>	2. Versão	3. Data <i>Dezembro 1985</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DIG/DGA</i>	Programa <i>GEOMA</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>MEDIDAS MAGNÉTICAS</i> <i>MAGNETOTELÚRICAS</i>			
7. C.D.U.: <i>550.38(99)</i>			
8. Título <i>MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS E GEOELÉTRICAS NA ANTÁRTICA</i>		10. Páginas: <i>23</i>	
		11. Última página: <i>22</i>	
		12. Revisada por	
9. Autoria <i>N.B. Trivedi</i> <i>A.L. Padilha</i> <i>J.C. de Andrade</i> <i>E.G. de Souza</i>		<i>J. M. Costa</i> José Marques da Costa	
Assinatura responsável <i>Nabin Trivedi</i>		13. Autorizada por <i>MARCO ANTONIO RAUPP</i> Marco Antonio Raupp Diretor Geral	
14. Resumo/Notas <i>Durante a IIIª Expedição Científica Brasileira à Antártica, organizada pela CIRM (Comissão Interministerial para Recursos do Mar), foram efetuadas, na estação Comandante Ferraz (62°S 05' S, 58° 23,5'W), medidas das variações diurnas das componentes H, D e Z do campo geomagnético e das variações magnetotelúricas no intervalo de 10 a 1000 segundos. O método de Briggs (1984) e Hibberd (1985) foi aplicado aos dados geomagnéticos tomados simultaneamente nas estações Comandante Ferraz e Cachoeira Paulista (22°41' S, 45°00' W) para monitorar as mudanças na intensidade das correntes Sq. Os dados magnetotelúricos, por sua vez, foram analisados para estimar o tensor de resistividades da crosta e do manto superior encontrados na península Antártica. Os resultados obtidos indicam a presença de uma espessa camada condutora situada à profundidade de 3,8 km.</i>			
15. Observações <i>Este trabalho foi parcialmente subvencionado pelo "FNDCT" (Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), através do Contrato FINEP 537/CT. Este trabalho será apresentado no 1º Encontro Regional de Geofísica.</i>			

MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS E GEOELÉTRICAS NA ANTÁRTICA*

N.B. Trivedi, A.L. Padilha, J.C. de Andrade e E.G. de Souza

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
C.P. 515, 12200-São José dos Campos, SP

*Convênio CIRM/INPE, Projeto nº 9507

RESUMO

Durante a IIIª Expedição Científica Brasileira à Antártica, organizada pela CIRM (Comissão Interministerial para Recursos do Mar), foram efetuadas, na estação Comandante Ferraz ($62^{\circ}05'S$, $58^{\circ}23,5'W$), medidas das variações diurnas das componentes H, D e Z do campo geomagnético e das variações magnetotelúricas no intervalo de 10 a 1000 segundos. O método de Briggs (1984) e Hibberd (1985) foi aplicado aos dados geomagnéticos tomados simultaneamente nas estações Comandante Ferraz e Cachoeira Paulista ($22^{\circ}41'S$, $45^{\circ}00'W$) para monitorar as mudanças na intensidade das correntes Sq. Os dados magnetotelúricos, por sua vez, foram analisados para estimar o tensor de resistividades da crosta e do manto superior encontrados na península Antártica. Os resultados obtidos indicam a presença de uma espessa camada condutora situada à profundidade de 3,8 km.

ABSTRACT

The diurnal variations in the H, D and Z components of the geomagnetic field and magnetotelluric field variations in the period range from 20 to 1000 seconds were conducted at the Brazilian station Comandante Ferraz ($62^{\circ}05'S$, $58^{\circ}23,5'W$) in the Antarctic peninsula, during the short period from 26th February to 17th March 1985. These measurements were conducted during the IIIrd Expedition to Antarctic organized by CIRM (Comissão Interministerial para Recursos do Mar). A method of Briggs (1984) and Hibberd (1985) is applied to daily variation geomagnetic field data taken simultaneously at Comandante Ferraz and Cachoeira Paulista ($22^{\circ}41'S$, $45^{\circ}00'W$) to monitor intensity changes in Sq currents. Long term measurements at these two stations will enable us to study physical processes in the ionosphere of the South Atlantic Magnetic Anomaly. Also magnetotelluric data are analysed to estimate resistivity tensor of the Earth's crust and upper mantle encountered at Antarctic peninsula. A thick conductive layer starting at about 3.8 km is seen. The resistivity curve ($\rho-T$) and a four layered model using Fischer's (1981) inversion method are presented.

INTRODUÇÃO

Como parte do projeto "Investigação Geomagnética na Antártica", do programa PROANTAR, coordenado pela Comissão Interministerial para Recursos do Mar (CIRM), o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), através do seu Departamento de Geofísica e Aeronômica, participou da IIIª Expedição Científica Brasileira à Antártica, durante o verão de 1985. Nesta ocasião foram efetuadas medidas geomagnéticas e geoeletricas na estação Comandante Ferraz ($62^{\circ}05'S, 58^{\circ}23,5'W$).

As medidas das variações diurnas geomagnéticas foram realizadas para estudar as correntes elétricas na ionosfera e na magnetosfera terrestre. Por outro lado, as medidas simultâneas das variações dos campos geomagnético e geoeletrico, na faixa de períodos de 20 a 1000 segundos, tiveram por objetivo estudar a indução eletromagnética e a distribuição de condutividades elétricas na crosta e no manto superior da Terra na região.

MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS

A variação diurna do campo magnético terrestre em dias magneticamente calmos é consequência de variações nas correntes elétricas da ionosfera, geradas pela ação do dínamo ionosférico. Existem dois sistemas de correntes circulares, um em cada hemisfério, com focos, ou centros, nas latitudes de $\pm 35^{\circ}$. Briggs (1984) e Hibberd (1985) mostraram uma maneira de monitorar as variações na intensidade destas correntes ionosféricas através da subtração das variações geomagnéticas da componente horizontal H entre duas estações, uma ao norte e outra ao sul do foco.

As estações Comandante Ferraz, com latitude geomagnética de $52^{\circ}S$, e Cachoeira Paulista ($22^{\circ}41'S, 45^{\circ}00'W$), com latitude geomagnética de $13^{\circ}S$, situam-se, respectivamente, ao sul e ao norte do foco do sistema de correntes Sq para o Hemisfério Sul. Apesar de es

tas estações não se situarem na mesma longitude geomagnética (diferença de 13°), foi feita uma tentativa para, usando o método de Briggs e Hibberd, estudar as variações Sq ionosféricas.

RESULTADOS

Durante o período de 26/02/85 a 17/03/85, operou-se, na estação Comandante Ferraz, um magnetômetro "fluxgate" para registrar as variações diurnas das componentes H, D e Z do campo geomagnético. Estas medidas foram registradas em papel gráfico através da utilização de um registrador analógico e, juntamente com aquelas obtidas na estação fixa de Cachoeira Paulista para o mesmo período, foram empregadas para ilustrar a utilização do método de Briggs e Hibberd.

As Figuras 1 e 2 apresentam as variações diurnas da componente H, observadas em Cachoeira Paulista e Comandante Ferraz entre os dias 28/02/85 e 03/03/85, assim como a diferença ($H_t(CP) - H_t(CF)$) no mesmo período. Note-se que, apesar das nítidas distinções entre as curvas das duas estações, a diferença entre ambas mostra, predominantemente, as variações Sq presentes. Isto indicaria que, com a realização de medidas magnéticas simultâneas nestas duas estações, poder-se-iam monitorar as variações em intensidade das correntes Sq no Hemisférico Sul.

FIGURA 1

FIGURA 2

Os dados adquiridos durante esta expedição foram, porém, de quantidade reduzida o que não permitiu uma análise mais rigorosa. Além disto, deve-se mencionar que o sensor do magnetômetro, devido a deslocamentos sofridos durante o processo de congelamento e degelo da região na época, teve de ser ajustado algumas vezes durante as medidas, o que impediu a obtenção de dados de longo período.

Obtiveram-se, porém, indicações seguras de que, com medidas magnéticas simultâneas em Cachoeira Paulista e Comandante Ferraz e a comparação destes resultados com outros adquiridos através de experimentos exclusivamente ionosféricos, poder-se-ia determinar a intensidade S_q e, conseqüentemente, isolar as variações causadas pelos processos ligados à precipitação de elétrons na região da anomalia magnética do Atlântico Sul.

SONDAGENS MAGNETOTELÚRICAS

Conforme já descrito anteriormente, o objetivo das sondagens magnetotelúricas (MT) realizadas em Comandante Ferraz foi aprimorar os conhecimentos já existentes sobre a região e testar os equipamentos desenvolvidos no INPE em condições climáticas extremamente difíceis.

DESCRIÇÃO GEOLÓGICA

A estação antártica brasileira Comandante Ferraz situa-se na península de Keller da ilha Rei George, integrante do arquipélago das Shetland do Sul, a noroeste da península Antártica. O resumo geológico descrito a seguir está baseado nos trabalhos de Barton (1965) e Birkenmajer (1982).

A ilha Rei George constitui-se quase totalmente de plutons e fluxos de lava, com rochas sedimentares ocorrendo apenas como camadas descontínuas entre os fluxos de lava. Sequências espessas (de até 915 m) de lavas piroxênio-andesíticas, que têm sido correlacionadas com o Grupo Vulcânico do Jurássico Superior da península Antártica, são as rochas mais antigas expostas na região. Estas rochas afloram principalmente nas penínsulas de Fildes e Barton e na baía do Almirantado. Nesta última região, onde se situa a península de Keller, o Grupo Vulcânico do Jurássico Superior foi extensivamente mineralizado e metassomatizado durante eventos associados à intru

são de plutons e durante atividades vulcânicas na era Terciária, sendo subdividido nos Grupos Enseada de Martel (com espessura superior a 1160 m) e Enseada Cardozo (acima de 500 m).

A Figura 3 sintetiza as unidades geológicas observadas na parte sul da península de Keller, exibindo também a localização da base brasileira.

FIGURA 3

AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

O método MT, cuja teoria básica foi desenvolvida por Cagniard (1953), utiliza medidas simultâneas das variações dos campos geomagnético e geelétrico induzidos, realizadas na superfície, para estudar a distribuição de condutividades no interior da Terra.

O modelo inicialmente proposto por Cagniard, embora adequado para uma Terra homogênea, sem variações laterais de resistividade, fornece resultados altamente distorcidos em regiões com estruturas mais complexas. O modelo de impedância tensorial (Cantwell, 1960; Bostick e Smith, 1962; Swift, 1967) descreve melhor a geologia frequentemente encontrada nas aplicações MT práticas. O modelo do tensor de impedâncias relaciona o campo elétrico (E) e o campo magnético (H) através de:

$$|E| = |Z| |H|, \quad (1)$$

onde o tensor de impedância é dado por:

$$|Z| = \begin{vmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{vmatrix} \quad (2)$$

Em situações bidimensionais, os campos elétricos e magnéticos são projetados num sistema de eixos rotacionado, com os valores de impedância principal, Z_{xy}' e Z_{yx}' , calculados com seus eixos paralelo e perpendicular ao "strike" da estrutura bidimensional. Se a geologia puder ser representada por um modelo bidimensional, Z_{xx}' e Z_{yy}' tornar-se-ão zero e a relação tensorial transforma-se em:

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xy} H_y, \\ E_y &= Z_{yx} H_x. \end{aligned} \tag{3}$$

A partir destas impedâncias as resistividades aparentes

$$\rho_{axy} = \frac{|Z_{xy}|^2}{W_\mu} \quad \rho_{ayx} = \frac{|Z_{yx}|^2}{W_\mu} \tag{4}$$

podem ser calculadas para um intervalo grande de frequências, usando as componentes das transformadas de Fourier das séries temporais dos campos elétrico e magnético medidas no campo.

Os princípios básicos do sistema de aquisição de dados MT do INPE foram descritos em Dutra et al (1983). Para esta sonda gem as medidas foram feitas na faixa de 20 a 1000 segundos, utilizando magnetômetros de indução (dois eixos - $H_x(N-S)$ e $H_y(L-O)$) para registrar as componentes horizontais do campo geomagnético. As medidas geoeletricas ($E_x(N-S)$ e $E_y(L-O)$), por sua vez, foram efetuadas medindo a diferença de potencial entre dois pares de eletrodos, instalados a uma profundidade de cerca de 30 a 40 centímetros e separados 100 metros entre si. Os sinais analógicos dos campos $H_x(t)$, $H_y(t)$, $E_x(t)$ e $E_y(t)$ foram digitalizados em intervalos de 5 segundos através de um conversor analógico-digital de 12 bits e registrados em casetes digitais.

O posterior processamento e interpretação destes dados obedece, em linhas gerais, ao método descrito em Trivedi et al (1985). Neste procedimento, calculam-se os espectros de autopotência e de potência cruzada para as componentes ortogonais dos campos elétrico e magnético, utilizando a técnica de FFT. Estes espectros são, a seguir, corrigidos das curvas de resposta dos equipamentos, suavizados por um filtro Hanning e suas médias são escolhidas para cada banda de frequência para fornecer dez estimativas espectrais por década. Estes valores médios são, por fim, utilizados para calcular diversas grandezas importantes do método MT, tais como as direções principais das estruturas, as magnitudes do tensor de impedância, as fases e resistividades aparentes, as funções de coerência e os parâmetros de dimensionalidade.

Muitos procedimentos já foram desenvolvidos para inverter os valores de resistividade aparente em função da frequência a fim de obter estimativas da resistividade verdadeira em função da profundidade. No caso destas sondagens utilizou-se, na etapa de inversão, o algoritmo descrito por Fischer et al (1981). Este esquema de inversão começa com os períodos mais curtos do conjunto de dados disponível, procurando explicar as resistividades aparentes e fases em termos de estruturas de duas camadas. O procedimento seguinte consiste em deslocar as análises para períodos mais longos, introduzindo novas camadas discretas em profundidades progressivamente maiores e tentando minimizar o desvio padrão entre os valores medidos e calculados. Neste caso foi efetuada uma adaptação deste algoritmo para torná-lo conversacional, o que possibilita a interferência do operador durante o processo de inversão.

RESULTADOS PRELIMINARES

As condições extremamente desfavoráveis à aquisição de dados magnetotelúricos verificadas na Antártica tornam-se evidentes na qualidade dos dados analisados até o momento. As principais difi

culdades encontradas relacionam-se com o difícil contacto dos eletrodos com o solo, numa região vulcânica e com cobertura de gelo e neve; com a proximidade do mar, produzindo efeitos costais (Neumann e Hermance, 1985); e com possíveis fluxos subterrâneos de água.

Com todos estes fatores adversos, a coerência entre os sinais geoeletricos e geomagnéticos é extremamente irregular (Figura 4a). Por outro lado, embora os parâmetros de dimensionalidade sejam características de estruturas tridimensionais ("skew" igual a 1 para todas as frequências), os valores dos ângulos de rotação, que determinam a direção principal das formações geológicas, é bastante estável, típico de estruturas bidimensionais (Figura 4b).

Por este motivo, resolveu-se efetuar a modelagem dos dados ao longo da direção principal de impedância máxima. As Figuras 4c e 4d exibem, respectivamente, tanto os valores observados para resistividade aparente e fase em função do período, como as curvas teóricas obtidas com o modelo proposto. Observe-se a dificuldade em ajustar o modelo aos dados experimentais obtidos, como consequência da dispersão destes valores.

FIGURA 4

O modelo obtido com a inversão é mostrado na Tabela 1. Compõe-se de quatro camadas, cumprindo ressaltar a presença de uma camada condutora a profundidade de 3,8 km. Esta mesma camada foi observada um pouco mais ao sul por Del Valle et al (1983). Sua presença é comum a todas as áreas vulcânicas, aparecendo sempre em profundidade bastantes rasas (Gregory e Lanzerotti, 1982), o que indica a possibilidade da existência de um processo tectônico ainda ativo.

As demais camadas presentes são aquelas comumente observadas em praticamente todas as regiões da Terra, com uma primeira camada relativamente resistiva, (neste caso, da ordem de 200 ohm.m), com

posta de sedimentos e rochas vulcânicas, sobrepondo-se a uma camada litosférica altamente resistiva (que aparece aqui como a terceira camada, com resistividade superior a 4000 ohm.m) e por fim um manto inferior altamente condutor, com resistividade inferior a 1 ohm.m.

TABELA 1

Afirmações mais conclusivas a respeito deste perfil de condutividades somente serão possíveis com a conclusão das análises sobre todos os conjuntos de dados adquiridos neste começo de ano e com a realização de outras sondagens, já previstas para o verão e inverno de 1986. Nestas novas sondagens os dados serão coletados numa faixa de períodos mais longos (entre 200 s e 10000 s) utilizando o magnetômetro "fluxgate" para registrar as variações do campo geomagnético. Espera-se com isto reduzir os erros experimentais observados, com a melhoria da estatística para os períodos mais curtos, e complementar a curva de resistividade para períodos mais longos e menos sujeitos às perturbações superficiais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado dentro do convênio CIRM/INPE, projeto nº 9507. Gostaríamos de agradecer ao comandante da estação Comandante Ferraz, Cmte. José Fernando Ermel, assim como a todo o pessoal do grupo base da estação pela valiosa cooperação durante a instalação e operação do equipamento utilizado. Agradecemos também ao Dr. Gaston Fischer do Observatoire de Neuchatel, Suíça, pela cessão de seu programa de inversão, e a diversos técnicos e engenheiros do INPE por sua participação, direta ou indireta, na IIIª Expedição Brasileira a Antártica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTON, C.M. -1965- The geology of South Shetland Islands III. The stratigraphy of King George Island. Sci. Repts. Brit. Antarct. Surv., 44:1-33.
- BIRKENMAJER, K. -1982- Mesozoic stratiform volcanic-sedimentary succession and andean intrusions at Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, Antarctica). Stud. Geol. Polon. 74:105-154.
- BOSTICK, F.X., Jr.; SMITH, H.W. -1962- Investigation of large-scale inhomogeneities in the earth by the magnetotelluric method. Proc. IRE, 50:2339-2346.
- BRIGGS, B.H. -1984- The variability of ionospheric dynamo currents. J. Atmos. Terr. Phys., 46(5):419-429.
- CAGNIARD, L. -1953- Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting. Geophys., 18(4):605-635.
- CANTWELL, T. -1960- Detection and Analysis of Low Frequency Signals. Ph.D. Thesis, Geophysics Laboratory, MIT.
- DEL VALLE, R.A.; FEBRER, J.M.; FOURNIER, H.G.; GASCO, J.C.; KELLER, M.A.; POMPOSIELLO, M.C. -1983- Argentine results in MT research of shore, along the NE coast of the Antarctic Peninsula. II. o E.U.G. Meeting, Strassbourg, Terra Cognita, 3(2-3):255.
- DUTRA, L.S.V.; TRIVEDI, N.B.; NORDEMANN, D.J.R.; MENDES, R.A.; MALDONADO, J.C.; BIANCHI NETO, J. -1983- O sistema MT-INPE. INPE-2705-NTI/176.

FISCHER, G.; SCHNEGG, P.A.; PEGUIRON, M.; LE QUANG, B.V. -1981- An analytic One-Dimensional Magnetotelluric Inversion Scheme. Geophys. J.R. astr. Soc., 67:257-278.

GREGORY, G.P.; LANZEROTTI, L.J. -1982- Electrical Conductivity Structure in the Lower Crust. Geophys. Surv., 4:467-499.

HIBBERD, F.H. -1985- The geomagnetic Sq variation - annual, semi-annual and solar cycle variations and ring current effects. J. Atmos. Terr. Phys., 47(4):341-352.

NEUMANN, G.A.; HERMANCE, J.F. -1985- The geomagnetic coast effect in the Pacific Northwest of the North America. Geophys. Res. Lett., 12(8):502-505.

SWIFT, G.M., Jr. -1967- A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Ph.D. Thesis, Geophysics Laboratory, MIT.

TRIVEDI, N.B.; PADILHA, A.L.; COSTA, J.M. DA -1985- Processamento de Dados Magnetotelúricos no INPE. IIº Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional da SBMAC, São José dos Campos, SP.

MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS E GEOELÉTRICAS NA ANTÁRTICA

N.B. Trivedi, A.L. Padilha, J.C. de Andrade e E.G. de Souza

Número de Tabelas = 1

Número de Figuras = 4

LEGENDA DA TABELA

Tabela 1 - Resultado da inversão dos dados MT de Comandante Ferraz.

TABELA 1

CAMADA	RESISTIVIDADE (ohm.m)	ESPESSURA (km)
1	190.	3,8
2	9	12,6
3	4000	52,5
4	1	INFINITA

LEGENDA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação diurna na componente horizontal H do campo geo magnético observado em Cachoeira Paulista e Cmte. Ferraz e diferença (H(CP)-H(CF)) para os dias 28/02/85 e 01/03/85.

Figura 2 - Variação diurna na componente horizontal H do campo geo magnético observado em Cachoeira Paulista e Cmte. Ferraz e diferença (H(CP)-H(CF.)) para os dias 02/03/85 e 03/03/85.

Figura 3 - Esboço geológico da parte sul da península de Keller, se gundo Birkenmajer (1982).

Figura 4 - Resultados magnetotelúricos obtidos: a) coerência; b) â ngulo de rotação; c) inversão da resistividade aparente; d) inversão da fase.

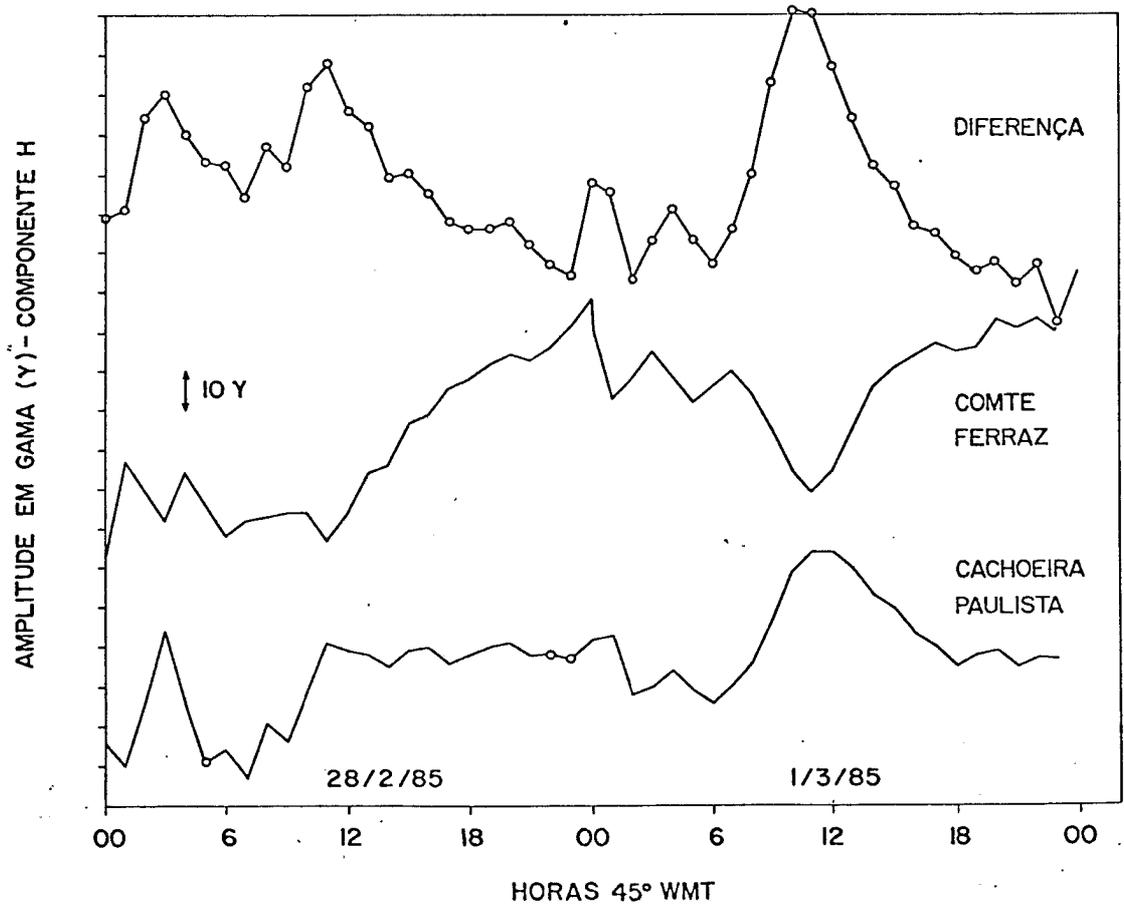


Fig. 1

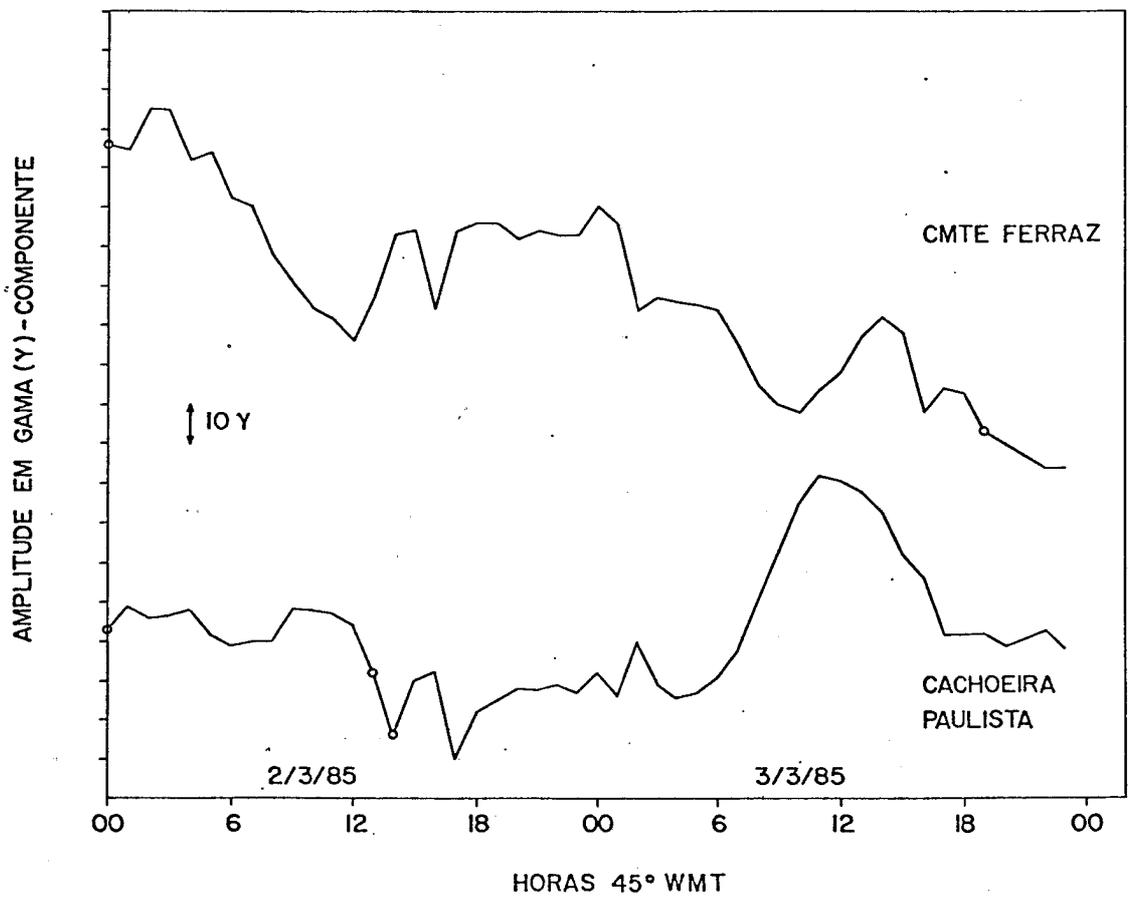


Fig. 2a

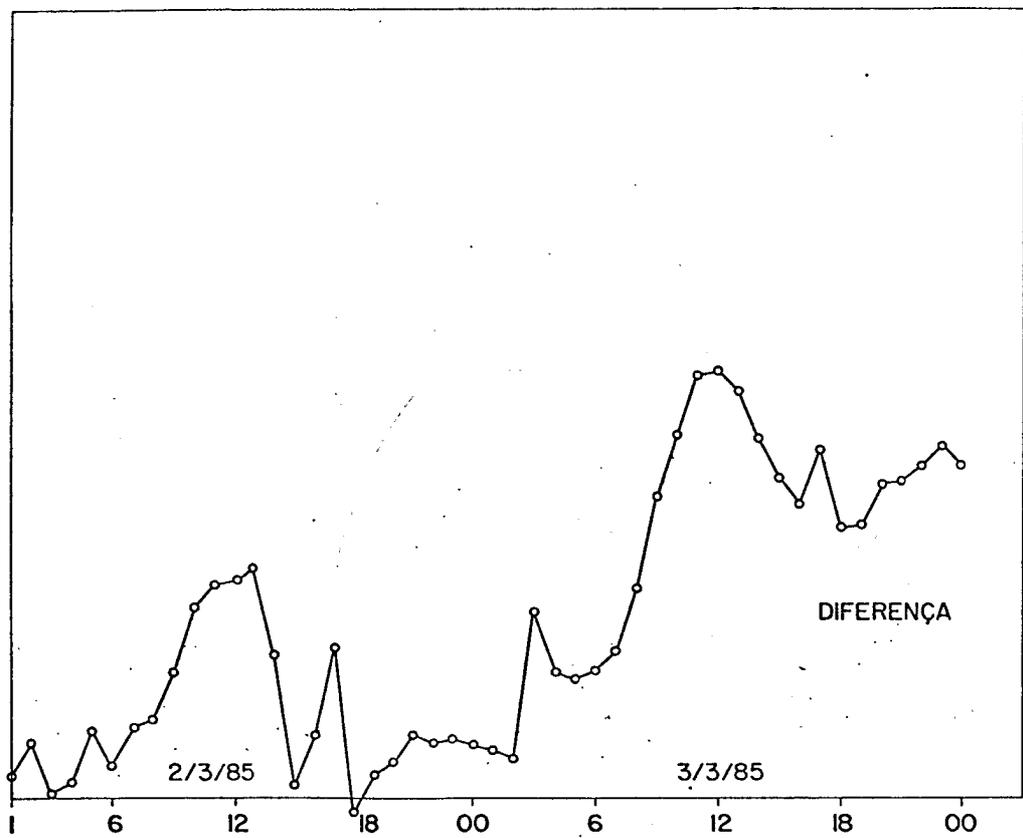


Fig. 2b

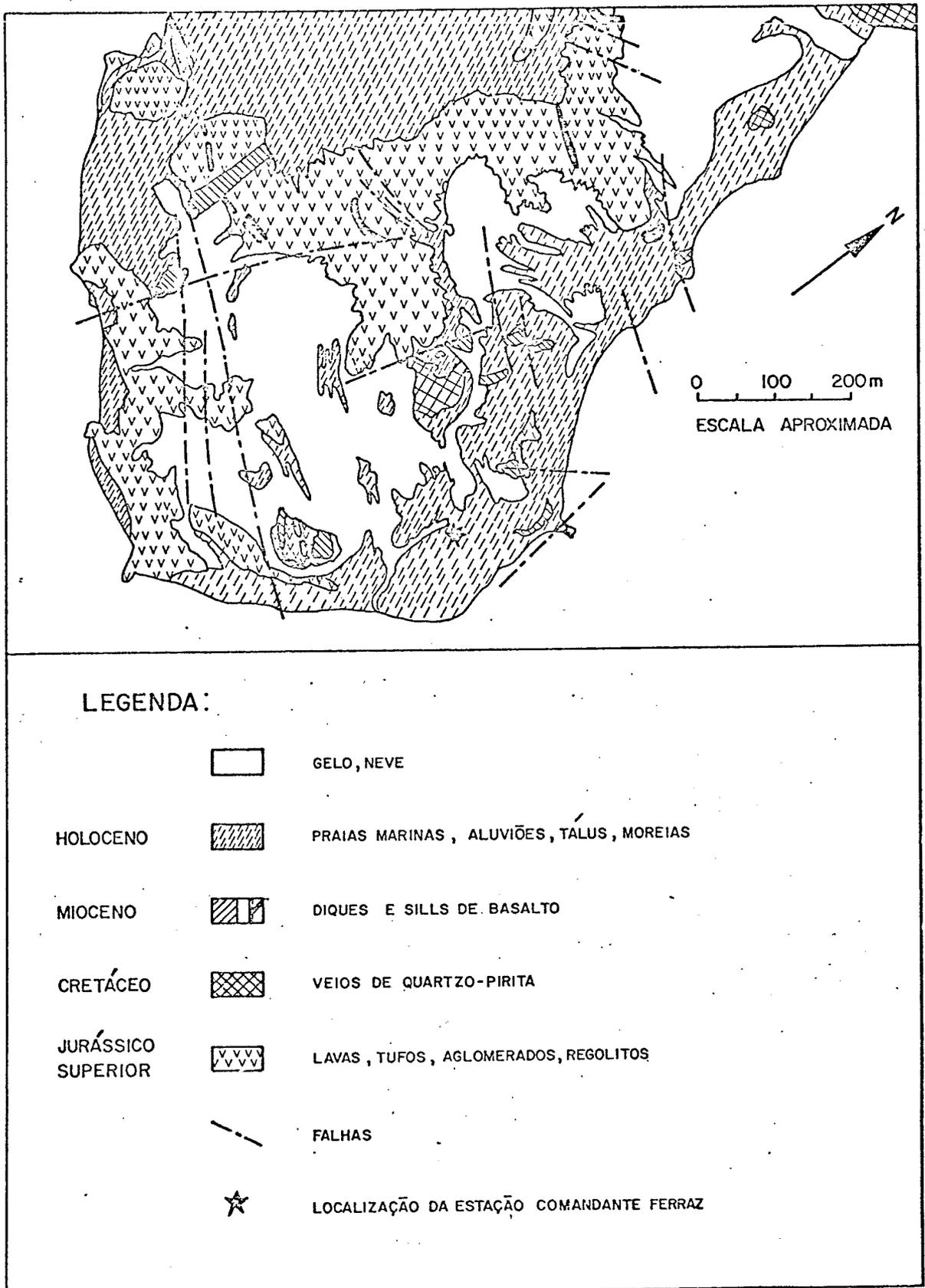


Fig. 3

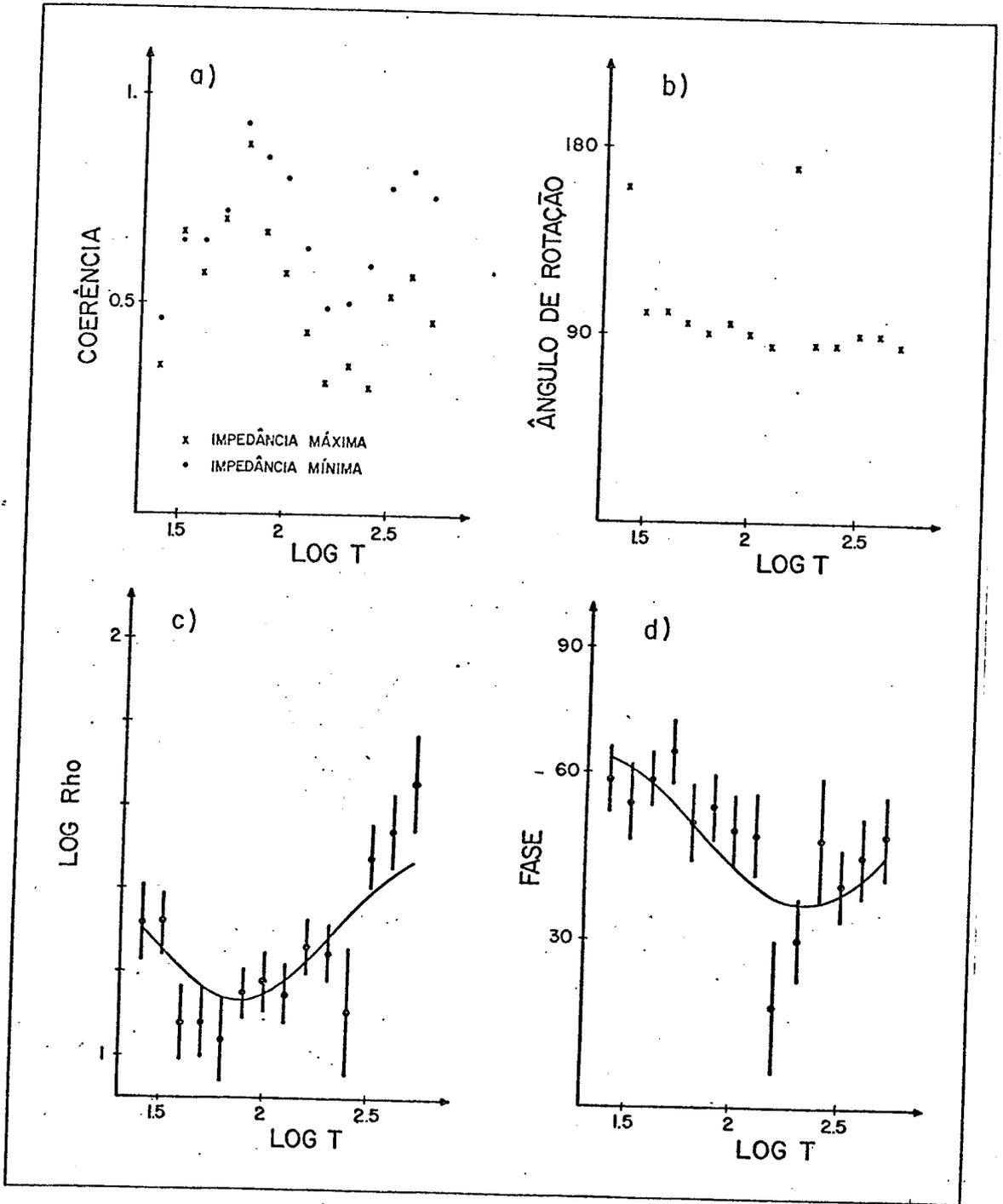


Fig. 4