



## Resultados preliminares de estudos magnetotélúricos para caracterização de estruturas profundas sob a borda sul do craton do São Francisco

Marcelo B. Pádua\*, Maurício S. Bologna, Ícaro Vitorello, Antonio L. Padilha, INPE, Brazil

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Resumo

São apresentados resultados preliminares de 23 sondagens MT profundas (períodos de 20-13.653 s) na região centro-sudeste do Brasil. As sondagens situam-se ao longo de 2 perfis na borda sul do craton do São Francisco, uma região que apresenta importantes anomalias de tomografia sísmica e do geóide em profundidades do manto superior. Análises dos parâmetros de decomposição do tensor de impedâncias e de pseudo-seções de fases mostram nítidas diferenças no comportamento geoeletrico em subsuperfície sob os dois perfis. Os dados MT das estações a oeste do craton são bastante uniformes, com resultados tipicamente 1D até grandes profundidades. Por outro lado, o sul do craton é bem mais complexo, com significativas mudanças laterais e em profundidade do strike geoeletrico. Esse comportamento é compatível com uma região afetada por duas zonas de colisão praticamente ortogonais.

### Introdução

A região centro-sudeste da América do Sul foi afetada por dois expressivos eventos magmáticos no Cretáceo. O primeiro, ocorrido ao redor de 130 Ma, foi responsável pelo extraordinário derrame de basalto continental (CFB) da Bacia do Paraná e adjacências. O segundo, com início em 80 Ma, gerou as ocorrências magmáticas de caráter potássico e máfico-ultramáfico, de extensa expressão nas bordas norte, nordeste, leste e sudeste da Bacia do Paraná, entre os estados de Mato Grosso e do Rio Grande do Sul.

Nos últimos anos, estudos gravimétricos e de tomografia sísmica trouxeram relevantes contribuições ao conhecimento geofísico do manto superior nessa região. De fato, dados de tomografia sísmica indicam velocidades sísmicas relativamente altas, características de áreas de escudo estável, a profundidades muito além dos 100 km, ultrapassando inclusive os 200 km abaixo do craton do São Francisco (VanDecar et al., 1995). Esse comportamento geral apresenta apenas poucas exceções (regiões anômalas), com velocidades muito mais baixas. Uma dessas anomalias ocorre abaixo de uma área situada na borda NE da Bacia do Paraná, a profundidades de 200 a 600 km. Como arcabouço subcontinental dessa região, estudos geológicos sugerem a possibilidade da presença de uma complexa confluência entre zonas de colisão: a faixa Brasília Meridional, de direção NW-SE, o cinturão Ribeira

Setentrional, de direção NE-SW, e a faixa Alto Rio Grande entre ambos.

Por outro lado, o processamento de dados gravimétricos (Molina e Ussami, 1999) mostra uma anomalia positiva do geóide, com amplitude de até 9 m, deslocada para leste da anomalia sísmica. De formato circular, com raio de cerca de 400 km centrado na borda sul do craton do São Francisco, essa anomalia alcança áreas onde ocorrem expressões magmáticas alcalinas do Cretáceo Superior (nas Serras da Mantiqueira e do Mar, e nas bacias Terciárias do Sudeste), em sua borda sul, e a província ígnea do Alto Paranaíba (APIP), em sua borda noroeste. A análise da razão geóide/topografia sugere a possibilidade dessa anomalia ter uma componente térmica, a uma provável profundidade de compensação de até 200 km.

Com o objetivo de fornecer novos vínculos para interpretar estruturas profundas na região, um extenso levantamento por métodos de indução eletromagnética está sendo realizado na borda sul do craton do São Francisco e suas faixas remobilizadas circunvizinhas. O trabalho aqui apresentado mostra a localização desse levantamento e apresenta uma discussão dos primeiros resultados obtidos com sondagens magnetotélúricas (MT) de longo período.

### Localização das estações

A Figura 1 mostra um mapa geográfico da região centro-sudeste do Brasil com a localização das estações até agora instaladas para coleta de dados de indução eletromagnética.

Dois tipos de levantamentos estão sendo realizados. Um deles faz uso de medidas de variações geomagnéticas de longo período (vários minutos), através de vários magnetômetros fluxgate dispostos em forma de grade e operados simultaneamente. É conhecido como método GDS (sondagens geomagnéticas profundas) e usado de forma qualitativa para localizar e mapear distribuições anômalas de condutividade elétrica, geralmente relacionadas a características geoestruturais profundas. Um outro trabalho apresenta os resultados preliminares desse levantamento GDS (Subba Rao et al., 2003).

O outro método mede simultaneamente variações temporais naturais dos campos geomagnético e geoeletrico induzido em um amplo espectro de frequências, tal qual observadas na superfície da Terra. É o método magnetotélúrico (MT) utilizado para se obter informações quantitativas sobre a distribuição de condutividade elétrica desde profundidades rasas até grandes profundidades.

O estudo MT em desenvolvimento concentra-se ao longo dos 2 perfis mostrados na Figura 1. Um deles, denominado PIU, consiste de 12 sondagens de longo período ao longo de um perfil de direção WSW-ENE.

Esse perfil posiciona-se ao longo do maior gradiente da anomalia do geóide anteriormente descrita, com as sondagens localizando-se tanto dentro como fora do cráton (conforme definido por Almeida, 1981), cruzando também a província de Piumhi. O outro perfil, denominado SJR, consiste de 11 sondagens de período longo, que se iniciam na faixa Ribeira e se estendem sobre a borda sul do cráton no sentido S-N. As duas últimas estações do perfil tomam a direção NW, para desviar da região de Belo Horizonte (muito ruidosa para métodos eletromagnéticos de sinal natural), aproximando-se do perfil PIU. Essa região em que ambos os perfis se encontram situa-se próximo ao centro da anomalia do geóide.

Para referência, a Figura 1 mostra também os dados disponíveis para anisotropia sísmica do manto superior na região, utilizando a fase SKS (James e Assumpção, 1996). Observam-se comportamentos distintos em cada um dos perfis MT. No perfil PIU, a anisotropia sísmica tem uma direção NW-SE bem definida. Porém, o perfil SJR situa-se em uma região de transição entre as direções NW-SE e NE-SW, compatível com a complexidade de uma região situada na confluência entre duas zonas de colisão.

### Coleta e processamento de dados

Os dados MT até agora disponíveis são de longo período (20-13.653 s), adquiridos por até 6 equipamentos operando simultaneamente e adquirindo dados durante cerca de duas semanas em cada sítio de sondagem. Por não se dispor ainda de dados de período mais curto (até milésimos de segundo) não se tentou fazer uma interpretação quantitativa dos resultados (inversão dos dados para obtenção da variação de resistividade com a profundidade).

Os dados das diferentes estações foram inicialmente analisados sem uma seleção preliminar da série temporal para eliminar dados muito ruidosos e sem o uso de referência remota ou processamento robusto. Com isso, tem-se uma informação geral da qualidade dos dados, identificando aqueles que devem produzir bons resultados em qualquer processamento. Essa informação é útil no processamento robusto, pois indica quais estações devem ser usadas como referência remota.

Após essa análise inicial, as séries temporais foram processadas para obter os elementos do tensor de impedância usando o programa de processamento robusto de Egbert (1997).

Um aspecto importante no processamento de dados MT é a necessidade de minimizar as distorções causadas por inhomogeneidades superficiais e procurar determinar a direção das estruturas geoeletricas (McNeice e Jones, 2001). Mostra-se aqui como exemplo a decomposição do tensor de impedâncias para uma das estações do perfil SJR.

O procedimento adotado consistiu em aplicar inicialmente o programa de decomposição fixando um ângulo de rotação e deixando que os demais parâmetros fossem calculados de modo independente para cada período. Essa operação foi repetida para diversos outros ângulos

até varrer  $90^\circ$  de rotação (equivale a verificar todas as direções possíveis, dada a ambigüidade de  $90^\circ$  do método MT)

A Figura 2 mostra os parâmetros de decomposição ("shear", "twist" e "channeling"), mais o erro de ajuste do modelo, em função do ângulo de rotação (strike em relação ao norte geográfico) e dos períodos para a estação 01. O que se deve procurar então é uma direção de strike que possua os parâmetros de decomposição mais estáveis ao longo dos períodos e com o menor erro de ajuste. No caso da estação, nota-se, especialmente no erro de ajuste, que o strike de  $-10^\circ$  ( $80^\circ$ ). Para períodos mais longos há uma nítida mudança de strike, com o melhor ajuste ocorrendo em  $35^\circ$  ( $-55^\circ$ ).

Essa característica é notada nas 5 estações mais setentrionais do perfil (01 a 05). Por outro lado, a estação 07 (no centro do perfil) apresenta apenas direção preferencial de ajuste nos períodos mais longos (similar ao das estações mais ao sul), não apresentando direção preferencial para períodos mais curtos. Já as estações mais ao norte (08 e 09) não indicam nenhuma direção preferencial, com características 1D (curvas de resistividade aparente paralelas e de fases praticamente idênticas).

No caso do perfil PIU, as análises mostraram que uma larga faixa de rotações consegue estabilizar os parâmetros "shear" e "twist". Isso se explica pelo fato dos dados de longo período terem características de estruturas 1D, similar ao observado nas estações mais ao norte do perfil SJR. No caso das estações do perfil PIU, porém, ao se impor a mesma direção geoeletrica para todo o perfil e para todas as frequências, a direção NS (EW) mostrou-se a mais adequada para representar a bidimensionalidade dos dados.

Uma forma quantitativa simples de se ter uma visão preliminar das estruturas geoeletricas ao longo de um perfil é através de pseudo-seções das fases. A Figura 3 mostra as pseudo-seções para o perfil PIU, obtidas interpolando as fases das componentes nas duas direções ortogonais (xy e yx) ao longo da projeção das estações em um perfil médio. As fases de uma das estações (03) não foram usadas na interpolação por estarem aparentemente contaminadas por ruído artificial local, o mesmo ocorrendo com os períodos mais longos das estações 09, 10 e 11.

Em geral, as fases estão acima de  $45^\circ$  e vão aumentando com o período, indicando a presença de um forte condutor a grandes profundidades. Serão porém necessárias novas sondagens na região em que aparecem os sinais de "+", os quais indicam dados de baixa qualidade.

### Discussões e conclusões

Há uma nítida diferença no comportamento geoeletrico em subsuperfície ao longo dos dois perfis. A região do perfil PIU parece ser bastante uniforme. A única característica relevante é a fase abaixo de  $45^\circ$  na componente yx para períodos menores que 200 s nas 6 estações a oeste do perfil (01 a 06). Essa feição correlaciona-se geograficamente com a geologia de superfície, com as estações 01 a 04 situando-se sobre a

formação Canastra, sendo interrompida sobre a formação Bambuí. Deve-se porém considerar que essa possível anisotropia pode ser produzida por ruídos associados à hidroelétrica de Furnas, que aparentemente distorcem de forma significativa a estação 03. Dados de períodos mais curtos, em fase de aquisição, serão fundamentais para aferir essa possibilidade.

Por outro lado, a região do perfil SJT é geoelectricamente bem mais complexa. Nesse caso, as estações mais ao sul (01 a 03) situam-se sobre o grupo Andrealândia, em uma região com direção principal de transporte tectônico no sentido S-N (Söllner e Trouw, 1997), sendo que esse grupo termina ao norte de uma longa falha de empurrão na direção E-W. Essas características dariam respaldo à escolha do strike  $80^\circ$  para os períodos mais curtos observados nessas estações. Também, a estação 05 localiza-se no limite sul do grupo São João del Rei, próximo a uma longa falha na direção E-W. Essa observação também justificaria a escolha do mesmo strike observado nas regiões mais ao sul. Por outro lado, em regiões mais profundas (períodos longos), um strike de  $35^\circ$  é compatível com as direções das falhas ao longo da faixa Ribeira.

#### Agradecimentos

Este estudo está sendo desenvolvido com financiamento da FAPESP (processos 00/00806-5, 99/12381-0 e 01/02848-0) e do CNPq (processos 475615/01-8, 350683/94-8, 351398/94-5 e 381576/02-7).

#### Referências

- Almeida, F.F.M.**, 1981. O cráton de Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: Simpósio sobre o cráton do São Francisco e suas faixas marginais, Anais, SBG/NBA-SE/SGM, Salvador, pp. 1-10.
- Egbert, G.D.**, 1997. Robust multiple station magnetotelluric data processing. *Geophys. J. Int.*, 130, 475-496.
- James, D.E., Assumpção, M.**, 1996. Tectonic implications of S-wave anisotropy beneath SE Brazil. *Geophys. J. Int.*, 126, 1-10.
- McNeice, G.W., Jones, A.G.**, 2001. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 66, 158-173.
- Molina, E.C. and Ussami, N.**, 1999. The geoid in SE Brazil and adjacent regions: new constraints on density distribution and thermal state of the lithosphere. *J. Geodyn.*, 28, 357-374.
- Söllner, F., Trouw, R.A.J.**, 1997. The Andrealândia depositional cycle (Minas Gerais/Brazil), a Post-Transamazonian sequence south of the São Francisco craton: Evidence from U-Pb dating on zircons of a metasediment. *J. S. Am. Earth Sci.*, 10, 21-28.
- Subba Rao, P.B.V., Padua, M.B., Bologna, M.S., Vitorello, Í., Padilha, A.L., Chamalaun, F.H., Rigoti, A.**, 2003. Preliminary results of ongoing GDS survey in center-southeast Brazil. 8<sup>th</sup> Int. Cong. Braz. Geophys. Soc., Rio de Janeiro, 4 pp.
- VanDecar, J.C., James, D.E., and Assumpção, M.**,

1995. Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces. *Nature*, 378, 25-31.

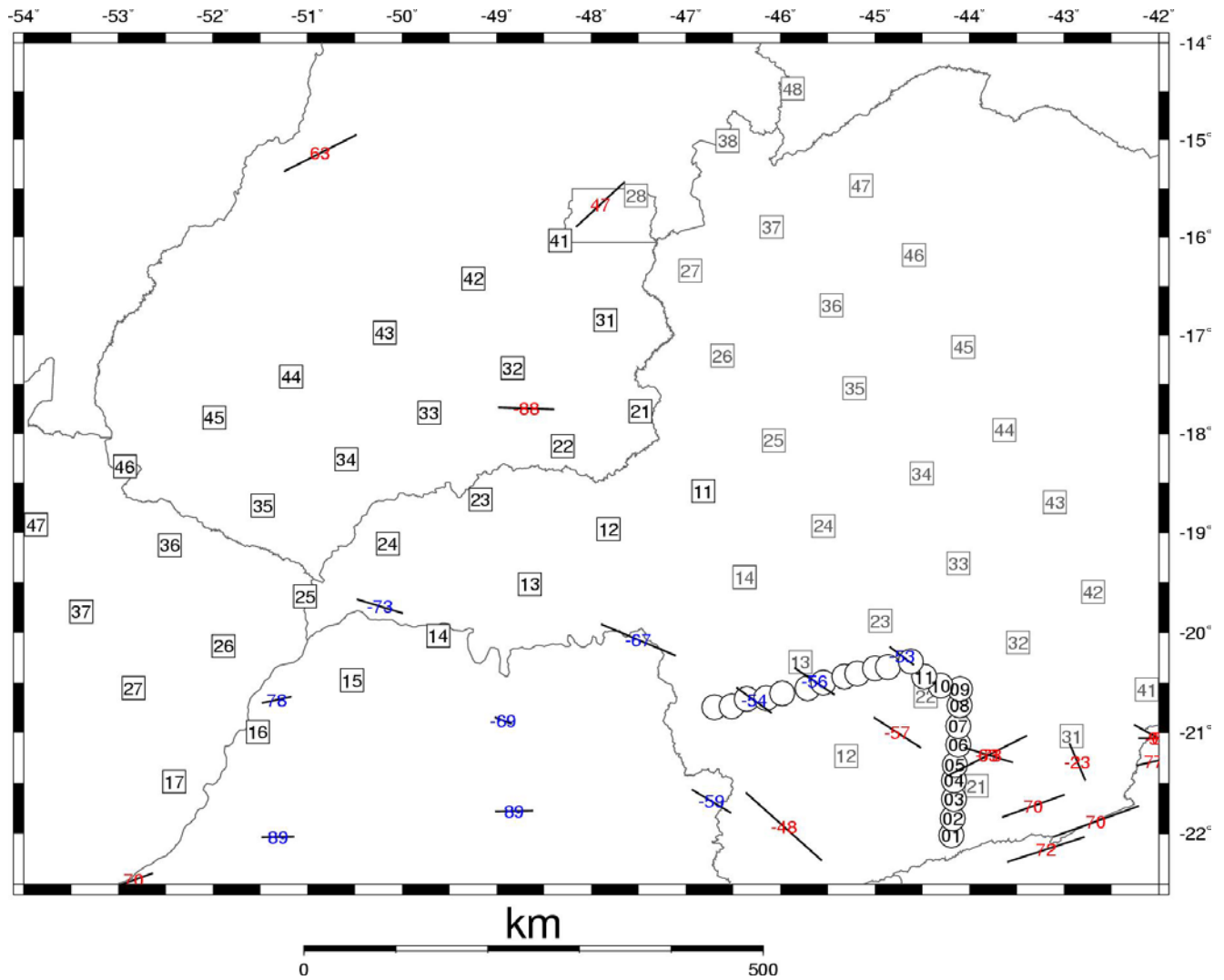


Figura 1 – Localização dos dados de indução eletromagnética na região centro-sudeste do Brasil. Os círculos indicam as estações MT de longo período, sendo os numerados referentes ao perfil N-S denominado SJR e os não numerados referentes ao perfil WSW-ENE denominado PIU. Os quadrados mostram a localização de estações GDS. Também é mostrada a posição de estações sismográficas com a direção estimada para a anisotropia do manto superior utilizando a fase SKS (James e Assumpção, 1996).

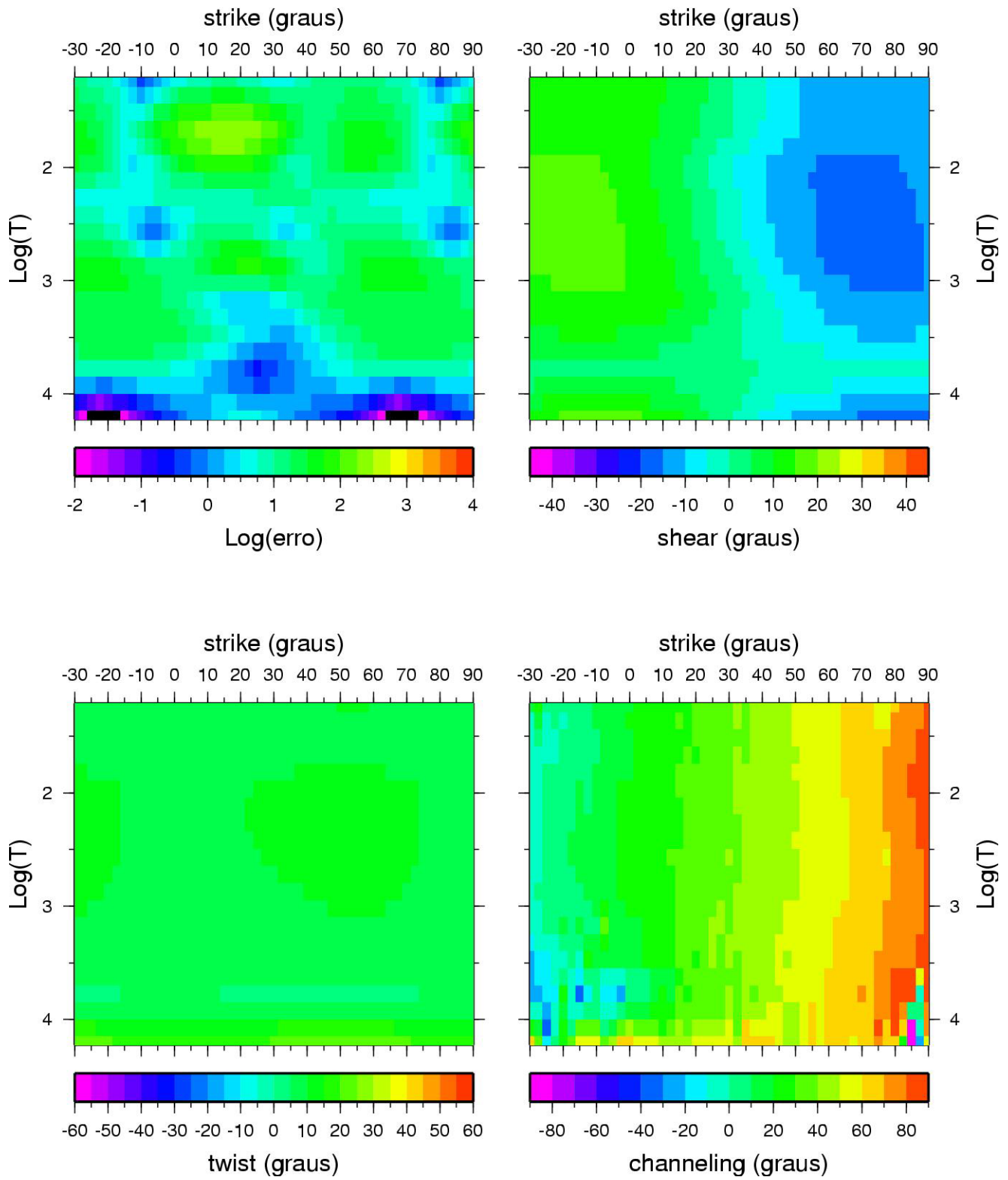


Figura 2 – Parâmetros de decomposição do tensor de impedâncias da estação 01 do perfil SJR, em função do strike e do logaritmo do período.

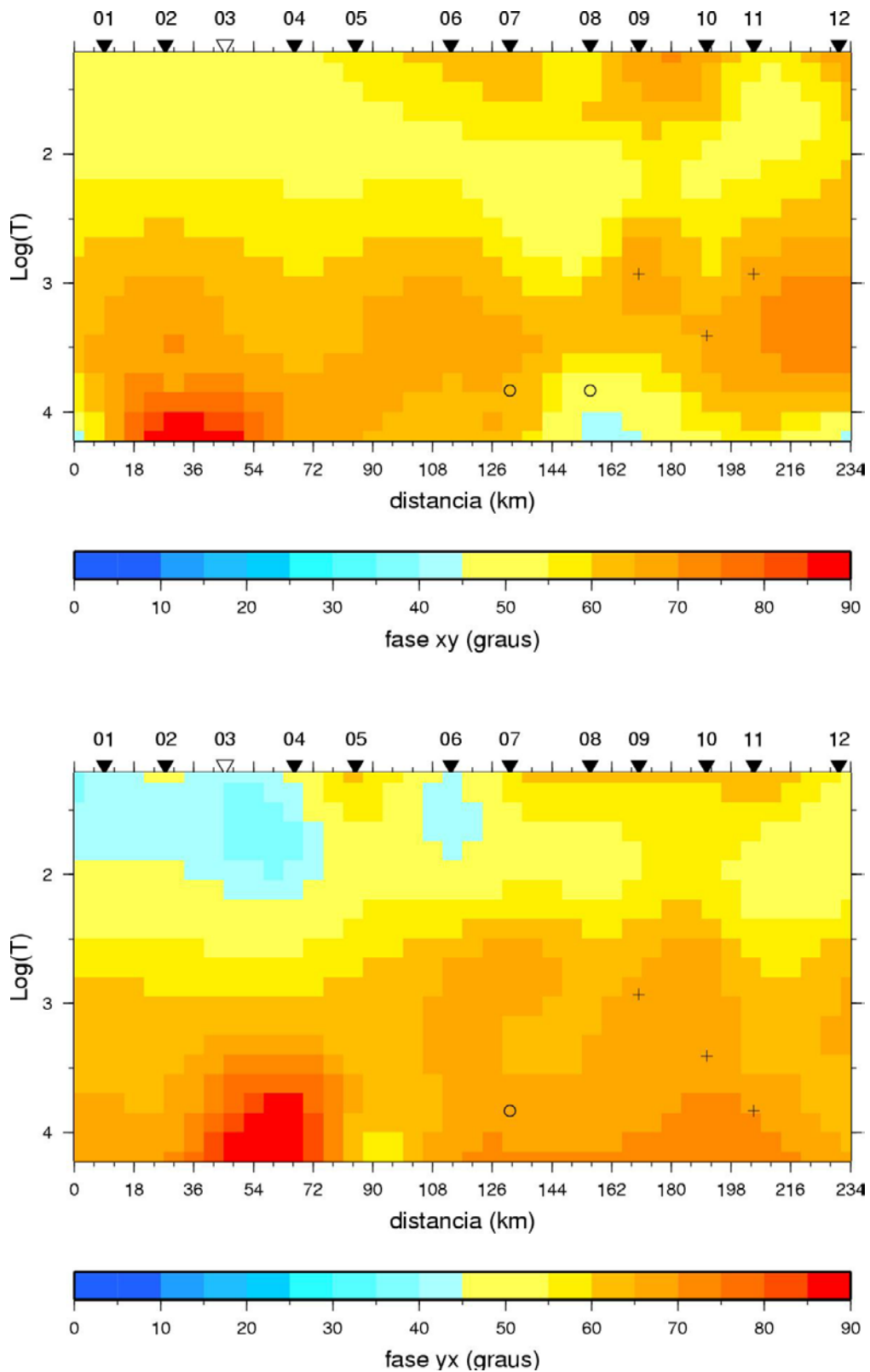


Figura 3 – Pseudo seções das fases ao longo do perfil PIU. A estação 03 (triângulo aberto) não foi usada na interpolação, sendo sua posição indicada apenas como referência. Os sinais “+” abaixo das estações 09, 10 e 11 indicam períodos mínimos acima dos quais os dados dessas estações foram desconsiderados na interpolação. Os círculos sob as estações 07 e 08 indicam dados ruidosos que também forma removidos antes de se realizar a interpolação.