



Análise de dados magnetotelúricos na região sísmica de Bebedouro-SP

Icaro José Assis Kume*, IAG/USP (bolsista do CNPq) e Mauricio de Souza Bologna, IAG/USP (orientador)

Abstract

Six broadband magnetotelluric (MT) soundings were collected across a seismic zone near the city of Bebedouro-SP, northeastern border of the Paraná Basin. Modern techniques of robust data processing were applied to estimate the MT tensor functions. As a whole, data display good quality, allowing to obtain information at depths of some tens of meters to some tens of kilometers. MT phase responses of orthogonal propagation modes present slightly splitting at period range of 0.0001-400 s that is thought to be largely influenced by the basalt layer. By rotating the impedance tensor at different angles we observe that the maximum anisotropy occurs at directions of ~N10W. This direction is roughly parallel to the main axis of the seismic zone. We believe this anisotropy could represent interconnected fractures inside the basalt layer. To periods greater than 1 s the direction of the maximum phase splitting (~N50W) appears to be related to regional features of the basin basement. Forward modeling of the MT responses shows that the Adamantina Formation has average resistivity and thicknesses of about 15 ohm.m and 30-80 m, respectively. The Serra Geral Formation has an average resistivity of 158 ohm.m and its thicknesses varies from ~600 m to ~350 m beneath the westernmost and easternmost MT sites, respectively. The depth of the geoelectric basement of the basin is about 2 km.

Introdução

A partir de 2004, uma série de tremores começaram a ser sentidos na região de Bebedouro-SP. A coincidência temporal do início dessas atividades com a abertura de vários poços tubulares para captação de água subterrânea tem sugerido que os poços induzem tais tremores. A sismicidade induzida por poços de água subterrânea constitui-se um fenômeno relativamente raro e pouco conhecido. Embora nos últimos a sismicidade na região de Bebedouro tenha sido continuamente monitorada, para se obter um conhecimento mais apurado sobre a localização e profundidade dos sismos é importante ter-se um maior conhecimento sobre as estruturas geológicas em subsuperfície. Para isto, estudos geofísicos integrados vem sendo realizados com o intuito principal de mapear a espessura e a estrutura interna do pacote basáltico que recobre a região e que supostamente abriga os sismos da região.

Este estudo consiste na análise de seis sondagens magnetotelúricas (MT) de banda larga separadas entre si

por 500-800 m dispostas quase ortogonalmente à zona de maior concentração de sismos (Figura 1).

Geologia da área

A região encontra-se na borda nordeste da bacia do Paraná, onde os derrames basálticos da Formação Serra Geral, do Cretáceo Inferior, possuem espessura média de 600 m. Embora basaltos geralmente sejam caracterizados por baixos valores de porosidade e permeabilidade, na região de estudo os mesmos apresentam frequentemente zonas inter derrames fraturadas e alteradas, possibilitando a formação de aquíferos (Assumpção et al., 2007). Sobreposto à Formação Serra Geral ocorre a Formação Adamantina, Cretáceo Superior, formada por um conjunto de fácies com espessura de até várias dezenas de metros compostas por bancos de arenitos portando estratificação cruzada intercalados a bancos de lamitos, siltitos e arenitos laminatos.

Metodologia e instrumentação

O método MT, proposto por Cagniard (1953), utiliza variações transientes do campo geomagnético como fonte de sinal para a determinação da distribuição de resistividade elétrica no interior da Terra. Esta é determinada relacionando as componentes ortogonais dos campos elétricos e magnéticos medidas simultaneamente na superfície terrestre. Maiores detalhes podem ser encontrados em Vozoff (1991).

Os dados deste estudo foram adquiridos por três sistemas GSM06 (Metronix Mgbh) de cinco canais e que operam numa faixa espectral entre 0,0008s – 1024s, pertencentes ao Grupo de Geomagnetismo do INPE. Estes utilizam eletrodos porosos não polarizáveis à base de cloreto de chumbo para medição do campo elétrico e magnetômetros de indução para medição do campo magnético.

Resultados

Através do processamento das séries temporais medidas no campo obteve-se o tensor de impedâncias MT em cada estação, a partir do qual derivaram-se curvas de resistividade elétrica e fase em função do período, que são as respostas MT usadas na análise dos dados. O processamento foi efetuado com o código robusto de Gary Egbert (Egbert, 1998).

Em geral, as respostas são contínuas e suaves, principalmente para dados com períodos de até 100 s.

No início das curvas, em períodos muito curtos (e portanto profundidades muito rasas), há pouca separação entre as fases dos modos XY e YX, indicando que o meio é praticamente 1D. Entretanto, em períodos um pouco maiores (0,002-0,1 s), observa-se uma anisotropia dos modos, sugerindo que o meio seja relativamente heterogêneo. A Figura 2.a mostra a estação 003, que possui a maior separação dos modos XY e YX.

Usando a transformada Niblett-Bostick obteve-se uma primeira aproximação da variação da resistividade com a profundidade sob cada estação. Antes de aplicar a transformada os dados foram interpolados com o código Rhoplus. Com se vê na Figura 2.b, os dados MT são sensíveis à estruturas com profundidades superiores a 20 m. A camada 1D, é pouco resistiva (~20-30 ohm.m) e se estende até ~150 m de profundidade, e deve estar associada aos sedimentos da Formação Adamantina. A partir daí há uma região relativamente resistiva até ~1 km de profundidade, supostamente englobando a Formação Serra Geral. Porém, a mesma é heterogênea. Posteriormente, há um decréscimo abrupto da resistividade, marcando a transição entre os basaltos e os sedimentos pré vulcânicos da bacia do Paraná. Os dados em períodos mais longos atingem profundidades superiores a 50 km e são relativamente mais complexos e ruidosos.

A partir da rotação do tensor de impedâncias em diferentes ângulos em uma certa estação pôde-se obter a direção na qual a separação (anisotropia) das fases XY e YX é máxima dentro de uma certa faixa de período. Embora haja uma ambigüidade de 90° nessa determinação, duas direções puderam ser mapeadas: ~N10W na faixa de 0,002-0,1 s e ~N50W para períodos acima de 1 s. Conforme visto na Figura 3 o "strike" em períodos curtos aproximadamente coincide com a direção da concentração dos sismos. Para períodos longos a direção do "strike" pode ser relacionada com a hidrografia regional, sendo subparalela ao Rio Pardo, cerca de 40 km a nordeste da área de estudo. Embora haja uma ambigüidade de 90° na determinação dessa direções, tais resultados são corroborados pela análise do campo magnético vertical (não mostrada), principalmente em relação às estruturas regionais.

Em duas estações (004, 006) a fase excede 90° em ambos os modos, possivelmente indicando a existência de distorções 3D. O trabalho de Pous et al., 2002, por exemplo, moelou tais respostas como devido à existência de um condutor raso em forma de anel condutivo dentro de uma camada resistiva sobre uma camada muito condutiva. Uma modelagem 3D partindo-se desse modelo de Pous et al. será testado nos dados de Bebedouro.

Através de modelagem direta 1D obteve-se um modelo geoeletrico para cada estação. Partiu-se inicialmente de um modelo geral feito com base em informações geofísicas disponíveis na Bacia do Paraná, como por exemplo estudos MT regionais nas partes nordeste e central da bacia (Stanley et al. 1985, Padilha et al., 1992, respectivamente), bem como dados de sondagens elétricas verticais (Carlos e Elis, 2008) e modelos sísmicos (Assumpção et al., 2007) da região de Bebedouro. Em seguida o modelo foi modificado até as curvas sintéticas e experimentais se ajustarem mais

precisamente. As curvas de fase e resistividade sintéticas obtidas pelo modelo geral se ajustaram bem às curvas experimentais em três estações (001, 003, 005), sendo necessários poucos ajustes posteriores. Em outras duas (004, 006), onde as fases excedem o quadrante, a curva geral difere bastante das curvas experimentais, possivelmente devido ao efeito 3D. Em tais estações, a modelagem 1D é portanto apenas uma primeira aproximação. Em outra estação (002) as curvas regional e experimentais são também bastante próximas, exceto pelo fato de que as curvas de resistividade encontram-se deslocadas por um fator constante ao longo do espectro. Isso é um forte indício da ocorrência do efeito de "static shift" nesta estação. Neste caso, criou-se um modelo baseado nos modelos das estações vizinhas no qual as curvas de fase fossem totalmente ajustadas enquanto que as curvas de resistividade tivessem a mesma forma, porém permitindo haver um deslocamento vertical.

No geral (ver Figura 4) observa-se uma camada superior mais heterogênea com alguns metros de espessura, provavelmente associada a sedimentos inconsolidados, sobreposta à uma camada relativamente homogênea e de baixa resistividade (média de $15,25 \pm 0,25$ ohm.m) e espessura variando de 30 à 80 m, associada aos arenitos da Formação Adamantina. Em seguida tem-se uma zona mais resistiva, com valores médios de 157 ± 14 ohm.m e com espessura variando de 350 a 600 m, associada à formação Serra Geral. Em maiores profundidades, tem-se uma região de baixa resistividade ($9,63 \pm 0,38$ ohm.m) e espessura em torno de 1500 m que caracteriza os sedimentos pré vulcânicos da Bacia do Paraná.

Discussão e Conclusões

De uma maneira geral, pôde-se mapear o topo e a base da camada de basalto da região de estudo. O topo encontra-se em torno de 40 m na parte central, tornando-se mais profunda (65 a 90 m) rumo às extremidades do perfil, fora da área de ocorrência dos sismos. Tal variação na profundidade do topo do basalto em um curto espaço (< 5 km) pode sugerir que a região tenha sofrido alguma reativação durante ou após o vulcanismo Serra Geral. A modelagem também mostra que a espessura do basalto varia significativamente, sendo mais espesso (~600 m) à oeste da concentração de sismos, e menos espesso à leste, atingindo cerca de 350 m apenas. Na região central as espessuras ficam entre 400 e 500 m.

Parece haver uma relação espacial entre a direção geral da distribuição dos sismos e a direção de máxima anisotropia das fases em períodos afetados pelos basaltos Serra Geral (períodos entre 0,002 e 0,1 s). Anisotropia nos dados poderia ser interpretada como devido à uma descontinuidade lateral ou como devido a um meio intrinsecamente anisotrópico, sendo sua distinção difícil usando somente por dados MT. Entretanto como os vetores de indução são relativamente fracos nesses períodos supõe-se que a anisotropia possa refletir heterogeneidades (por exemplo, fissuras alinhadas na direção NNW) dentro da camada de basalto.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio da Fapesp (processo n° 2007/04325-0) e do CNPq através de uma bolsa de iniciação científica PIBIC/CNPq (processo n° 122928/2009-1). Os autores agradecem ao Dr. Ícaro Vitorello e à toda equipe de campo e laboratório do Grupo de Geomagnetismo do INPE, ao Professor Dr. Vágner Roberto Elis e ao Ivan Mamede Carlos do IAG-USP.

Referências

Assumpção, M., Yamabe, T., Barbosa, J.R., Lopes, A.E.V. e Balancin, L., 2007. Atividade Sísmica no Distrito de Andes, Bebedouro, 2005-2006, e sua Relação com a Perfuração de Poços Tubulares. *Relatório não publicado* (www.iag.usp.br/~marcelo/bebedouro).

Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, p.605-635.

Carlos, I. M. e Elis, V. R., 2008. The correlation between geoelectrics and hydrodynamics parameters of aquifers:

Transversal Resistance versus Transmissivity in Bebedouro's region, southeast of Brazil. In: Proceedings of 21st SAGEEP. Denver CO: EEGS. v. 1, p. 1026-1032.

Egbert, G.D., 1997. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. *Geophys. J. Int.*, 130, 475-496.

Vozoff, K., 1991. The magnetotelluric method. In: Electromagnetic methods in Applied geophysics. V2. Applications. SEG, Tulsa, p. 641-711.

Padilha, A.L., Trivedi, N.B., Vitorello, I. & Costa, J.M., 1992. Upper crustal structure of the northeast Paraná Basin, Brazil, determined from integrated magnetotelluric and gravity measurements. *J. Geophys. Res.*, 97, 3351-3365.

Pous, J., Wiebke, S., Schnegg, P. A., Muñoz, G., Martí, J. e Soriano, C., 2002. Magnetotellurics study of the Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands): structural and hydrogeological implications. *Earth and Planet. Sc. Lett.*, 204, 249-263.

Stanley, W. D., Saad, A.R. e Ohofugi, W. 1985. Regional Magnetotellurics Surveys in Hydrocarbon Exploration, Paraná Basin, Brazil. *AAPG Bull.*, V. 69, N°3, p 346-360.

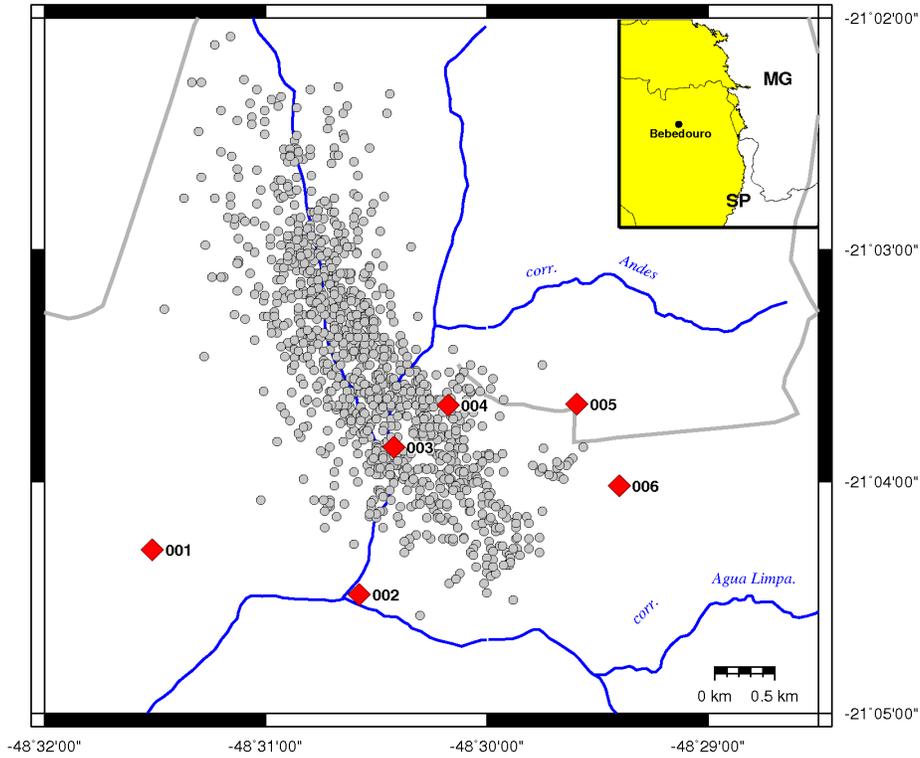


Figura 1 – Localização das estações MT (losangos vermelhos) juntamente com a concentração de sismos (círculos cinza) na região de Bebedouro. No canto superior direito tem-se o limite da Bacia do Paraná (região amarela).

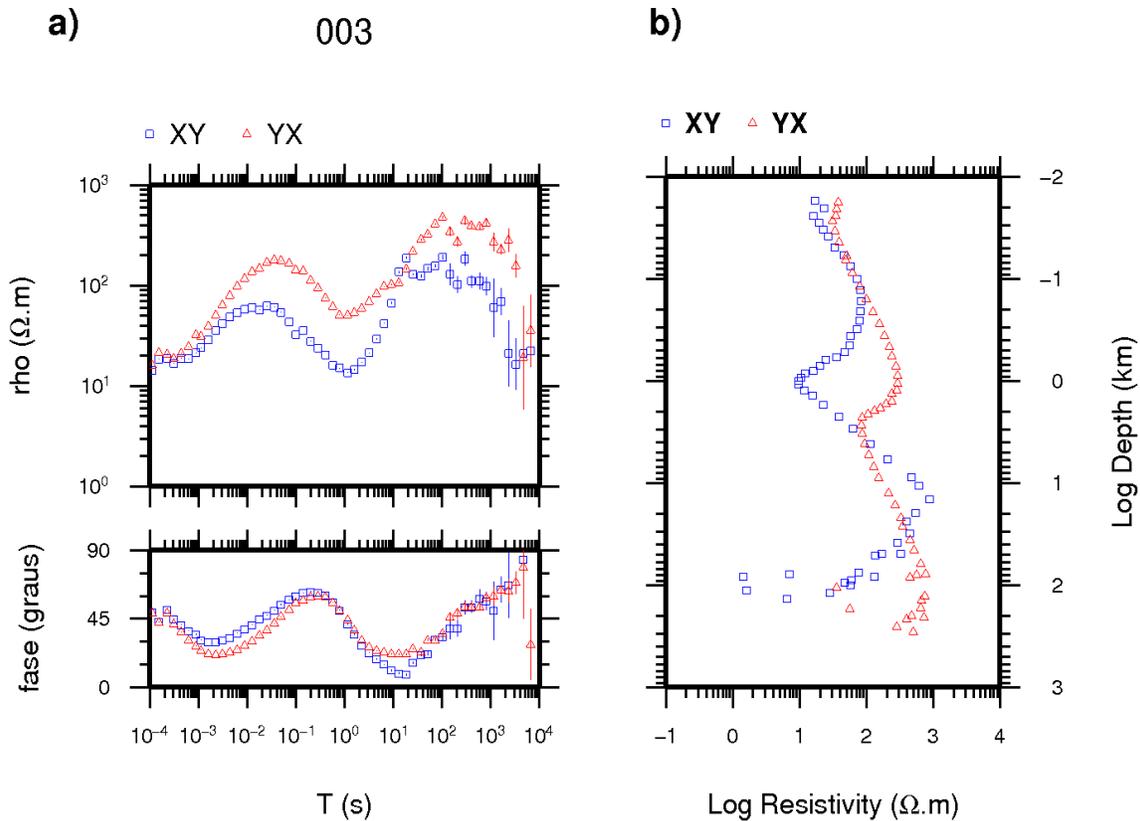


Figura 2 – (a) Curvas de resistividade aparente e fase da estação 003 em duas direções ortogonais XY (N20W) e YX (N70E). (b) Transformada Niblett-Bostick das curvas mostradas em 2.a.

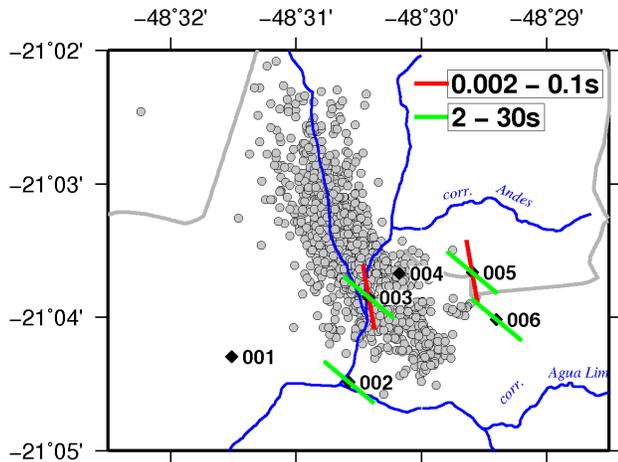


Figura 3: Direções da máxima separação das fases XY e YX obtidas por rotação da matriz de impedâncias em duas faixas de períodos distintas. Curtos períodos (barras vermelhas) amostram profundidades correspondentes à camada de basalto enquanto períodos mais longos (barras verdes) correspondem a estruturas regionais. Estações sem barras não apresentaram anisotropia significativa.

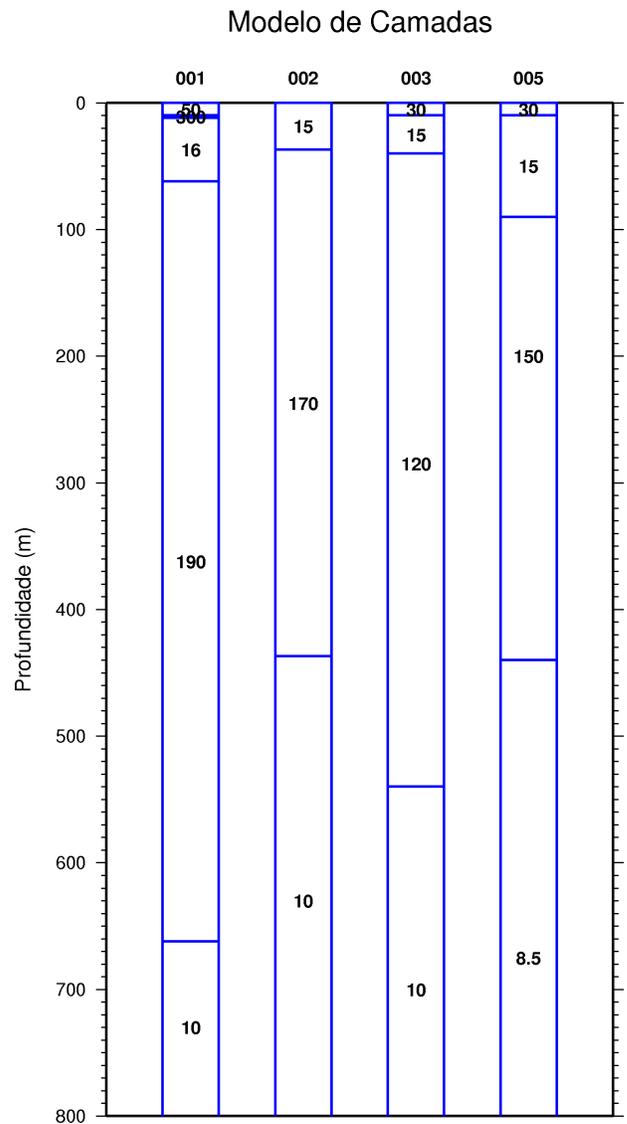


Figura 4: Modelo geológico criado a partir da modelagem direta 1D em cada sondagem. Números em cada camada são valores de resistividade elétrica em ohm.m. As estações 004 e 006 não foram consideradas pois apresentam fases excedendo 90°.