Caracterização Geotérmica na Bacia de São Francisco através da integração de Dados Magnetotelúricos e de Temperatura

Silva, H.T. A. and Solon, F. F., Universidade Federal Fluminense - UFF

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no X Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

O presente trabalho apresenta uma reinterpretação tridimensional (3D) de um levantamento MT realizado na bacia do São Francisco. Com o objetivo de caracterizar a estrutura geoelétrica mais profunda e, analisar dados geotérmicos disponíveis na região para estabelecer uma correlação entre a anomalia condutiva com uma possível região de interesse geotérmico. Resultados preliminares sugerem que existe uma correlação espacial entre anomalia condutiva mais profundas e a presença de temperaturas maiores que 80℃ em profundidades entre 4 e 8 km. Essa anomalia condutiva pode estar associada a um recurso de rocha quente e úmida (HWR).

Introdução

A bacia de São Francisco tem sido extensivamente estudada, tanto para exploração de recursos de petróleo e gás quanto para o aprofundamento da compreensão das estruturas geológicas (Alkmim and Martins-Neto [2001]; Pinto and Martins-Neto [2001]; Teixeira et al., 2017). Na atual área de estudo (Fig.1), imagens de satélite foram usadas para mapear áreas de infiltração de gás, especialmente nos rios São Francisco, Paracatu e Urucuia (Romeiro-Silva [2005]; Meister and et al. [2007]). Curto and et al. [2012] aplicaram métodos aerométricos e magnéticos para a detecção de infiltrações de hidrocarbonetos e seus possíveis controles estruturais na área do Remanso do Fogo na confluência dos rios Paracatu e São Francisco. Interpretações sísmicas anteriores de Hercos et al. [2008] sugerem que esta área particular rica em infiltrações é sustentada por um alto estrutural do embasamento. O gás também foi amostrado em vários intervalos nas formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas no poço 1-RF-1-MG da Petrobras e em zonas de depressão circulares (16°33,605' S; 45°20,620' W) (Prinzhofer et al. [2019]) na linha MT1.

Um estudo conduzido por Solon et al. [2015] utilizou a técnica de inversão 2D de dados MT, combinada com informações de poços, sıismicas, gravimétricas e magnetométricas, para caracterizar as propriedades geoelétricas das formações sedimentares e do embasamento da bacia. Especificamente, o estudo focalizou em uma área conhecida como Remanso do Fogo, localizada na região central da bacia.

Estudos feitos a partir de integração dos dados geotérmicos convencionais com os dados de levantamentos aeromagnéticos (Vieira [2015]) apontam que esta bacia é caracterizada por recursos geotermais do tipo baixa entalpia até 3 km de profundidade, com possibilidades na exploração de recursos HDR (Hot dry rocks - Rochas quentes secas). Essas rochas costumam apresentar temperaturas maiores que 150℃ em profundidades menores que 6 km, onde a maior parcela desses recursos se encontra nas bordas da parte sul da bacia. O trabalho de Vieira [2015] destaca o papel dos dados eletromagnéticos na identificação de áreas com potencial geotérmico.

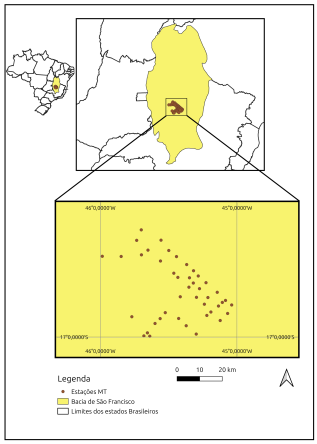

Figura 1: Mapa mostrando as localizações das estações MT na área de estudo na Bacia de São Francisco.

Sistemas geotérmicos são caracterizados por um elevado fluxo térmico e por isso são normalmente investigados através de métodos geotérmicos. Por outro lado, as rochas dos sistemas geotérmicos apresentam grandes variações na condutividade elétrica decorrentes, por exemplo, do conteúdo de água presente nos poros, da porosidade, salinidade do fluido e alteração mineralógica. Assim, a caracterização destes sistemas em termos da distribuição de condutividade elétrica em subsuperfície pode ser feita a partir do método MT.

O presente trabalho apresenta uma reinterpretação tridimensional (3D) da pesquisa de MT realizada nesta bacia por (Porsani [1993]; Porsani and Fontes [2001] e Solon et al. [2015]). Nosso objetivo é empregar a inversão 3D MT para uma caracterização mais precisa da estrutura geoelétrica mais profunda da bacia de São Francisco, e para investigar: i) a existência de uma anomalia condutiva mais profunda; ii) validar essa anomalia através de modelagem e inversão de dados sintéticos; e iii) analisar dados geotérmicos disponíveis na região para estabelecer uma correlação entre a anomalia condutiva com uma

possível região de interesse geotérmico. A partir desta análise, a inversão dos dados e sua comparação com informações geotérmicas revelam uma marcante anomalia condutiva no embasamento da bacia, correlacionada com ocorrências de HWR. Essa descoberta é de particular interesse, sugerindo a possível existência de alvos para recursos geotérmicos de baixa entalpia.

Contexto geológico

A Bacia do São Francisco cobre uma área de 379.357 km² e tem uma espessura máxima de sedimentos de 5.000 m (Alkmim and Martins-Neto [2001]). Localiza-se no interior do Brasil, sobre o Cráton do São Francisco, englobando regiões dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins e Distrito Federal. É classificada como uma bacia policíclica intracratônica, levemente deformada na porção central e mais fortemente deformada em suas bordas. A bacia é preenchida principalmente por rochas clásticas e carbonáticas Neoproterozóicas do Grupo Bambuí. Estudos de Braun et al. [1990] sugerem que os sedimentos pertencentes ao Grupo Bambuí foram formados no Proterozóico Superior (Vendiano), o que torna a Bacia do São Francisco interessante para a prospecção de hidrocarbonetos.

A coluna estratigráfica proterozóica da Bacia do São Francisco tem sido rotineiramente dividida em três grandes pacotes ou sequências deposicionais: Sequências Espinhaço, Macaúbas (Proterozóico inferior a médio), e Bambuí (Proterozóico superior, Vendiano) (Texeira et al. [1993]). Alkmim and Martins-Neto [2001] apresentaram Supergrupo Espinhaço (paleo/mesoproterozóico) o Grupo Macaúbas (neo-proterozóico) e o Grupo Bambuí (neoproterozóico).

O embasamento tectônico da Bacia de São Francisco é constituído essencialmente pelo Cráton de São Francisco, formado por rochas arqueanas e paleoproterozóicas que faziam parte da formação do supercontinente Atlântica (Alkmim and Martins-Neto [2001]). Segundo Almeida [1977], o cráton não fez parte dos processos orogênicos do Evento Brasiliano. Romeiro-Silva [2005], através da observação de linhas sísmicas regionais, sugerem que o Cráton de São Francisco deve ter como limite faixas dobradas marginais brasilianas quando envolvendo o embasamento (estilo estrutural thick-skinned).

Metodologia

Os dados MT utilizados neste trabalho, foram adquiridos na década de 90 pelo Observatório Nacional em convênio com CENPES/Petrobras. As sondagens magnetotelúricas foram levantadas na porção central da Bacia do São Francisco, totalizando quarenta e três estações ao longo de oito perfis MT, cobrindo um intervalo de período de 0,001 a 100 s, sondando a estrutura de resistividade do subsolo até uma profundidade máxima de cerca de 15 km. O levantamento inicial foi realizado em etapas por Porsani and Fontes [1993] e Porsani and Fontes [2001], ao longo das linhas sísmicas de reflexão levantadas pela Petrobras, cobrindo uma área de 11.000 Km^2. Os dados deste estudo foram previamente processados e interpretados em relatórios não publicados Porsani and Fontes [1993] e Porsani [1993], e depois apresentados em Porsani and Fontes [2001].

Estes estudos anteriores assumem a subsuperfície horizontal e em camadas nas quais a variação de resistividade é apenas na direção vertical. Com os processamentos feitos anteriormente, os dados originais da série temporal não estavam disponíveis para nosso estudo. Apenas o conjunto de dados formado pelas componentes não rotacionados yx, xy (direções de medição leste-oeste e norte-sul magnéticas originais) das curvas de resistividade aparente e fase puderam ser recuperadas e foram usadas para o presente estudo de inversão 3D.

Seja um conjunto de estações MT localizadas na superfície da Terra, em pontos $(x_l\ ,\ y_l\ ,\ z_l\ ),\ l = 1,...,N$. As observações obtidas em cada estação, as medidas de resistividade aparente e fase para cada frequência são agrupadas em um vetor **d** denominado vetor de dados observados (equação: 1). De forma análoga a equação 1, temos o vetor de dados preditos $\mathbf{d}(\sigma)$ com as componentes xy e yx da resistividade aparente e fase para toda as frequências em todas as estações.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \rho_{xy}(\omega) \\ \phi_{xy}(\omega) \\ \rho_{yx}(\omega) \\ \phi_{yx}(\omega) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

Neste trabalho foi realizada a inversão 3D dos dados MT para estimar uma distribuição de resistividade da terra com base em observações reais dos dados MT. No problema inverso MT, procura-se estimar um modelo de condutividade σ que minimiza o resíduo entre o vetor de dados preditos $\mathbf{d}(\sigma)$ e o vetor de dados observados **d**. Neste trabalho, este problema não-linear é formulado de acordo com a metodologia proposta por Egbert and Kelbert [2012] e Kelbert et al. [2014]. Esta metodologia consiste em estimar, por meio do método dos gradientes conjugados não lineares (NLCG - conjugate gradients), o vetor de parâmetros σ que minimiza a seguinte função:

$$\Phi(\sigma) = [\mathbf{d} - \mathbf{d}(\sigma)]^T \mathbf{C}_d^{-1} [\mathbf{d} - \mathbf{d}(\sigma)] + \nu [\sigma - \sigma_0]^T \mathbf{C}_\sigma^{-1} [\sigma - \sigma_0] \tag{2}$$

em que $\mathbf{C}_d$ é a matriz diagonal de covariância dos dados, σ_0 é um modelo de referência, ν é o parâmetro de regularização e $\mathbf{C}_\sigma$ é a matriz de covariância dos parâmetros.

O modelo de inversão resultante foi utilizado como modelo inicial para novas inversões, visando obter um modelo final que apresentasse a melhor resolução possível. Um error floor de 30% de $\mathbf{d}l|^{(1/2)}$ foi atribuído ao dados. O resultado parcial é mostrado a seguir.

O dado de temperatura utilizado nesse trabalho faz parte do banco geotérmicos que mapeia o fluxo de calor em todo o território brasileiro gerido pelo Laboratório Geotérmico do Observatório Nacional (LabGeot/ON). Diversos estudos já foram feitos usando esses dados em todo o país e em particular na bacia de São de Francisco (Alexandrino and Hamza [2007]; Alexandrino [2008]; Vieira [2015]; Vieira et al. [2015]; Lacasse et al. [2022] e Guimarães et al. [2022]).

A prática comum adotada para avaliação de temperaturas na crosta é baseada no desenvolvimento de modelos unidimensionais. O modelo adotado nesta pesquisa foi desenvolvido por Wang and et al [1996] (eq: 3). Neste

modelo a condutividade térmica é assumida constante e a produção de calor varia exponencialmente.

$$T_Z = \frac{A_0 D^2}{k}[1 - e^{\frac{Z}{D}}] + \frac{(q_0 - A_0 D)}{k}.Z + T_0 \quad (3)$$

onde A_0 é a produção de calor radiogênico, D é parâmetro de decaimento exponencial, q é o fluxo de calor, k é a condutividade térmica e T é o gradiente de temperatura. O resultado é mostrado a seguir.

Resultados

A inversão foi feita respeitando um compromisso entre a resolução e as limitações computacionais, para isso utilizou-se uma abordagem chamada $NestedGrid$, descrita por Meqbel et al. [2014]. Esta abordagem é utilizada para evitar malhas com um grande número de células, mas, ao mesmo tempo, assegura uma malha suficientemente fina na área de interesse. Além disso, essa abordagem é um método empírico para resolver o efeito da borda. Na abordagem $NestedGrid$, uma malha grosseira é utilizada para calcular o campo elétrico regional. Este campo elétrico é imposto como uma condição de contorno e modelo inicial para uma malha menor, mais restrita à área de interesse.

O modelo maior utilizado é formado por uma malha composta por 70 × 75 × 45 células, atingindo uma profundidade máxima de 480 km. A distância máxima na direção x é de 83.200 km e na direção y é de 102.400 km. Com uma distância mínima entre as estações de 2.200 km e aumentou logaritmicamente com um fator de 1.3 nas regiões das bordas da malha. O tamanho inicial das células na direção z foi de 30 m para as células próximas à superfície e aumentou logaritmicamente com um fator de 1.2.

O primeiro resultado a ser mostrado foi obtido utilizando um modelo inicial homogêneo de 100Ωm. A Figura 2 mostra o resultado da inversão após 160 iterações, com o valor de rms normalizado de 1.72, representado como uma seção transversal ao longo de um perfil. As posições das estações MT estão plotadas na imagem para ajudar na localização.

O modelo de resistividade (Fig.2) mostra uma zona condutiva que caracteriza o pacote sedimentar de aproximadamente 2km de espessura. Não foi possível diferenciar as rochas carbonáticas das Formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagas das demais formações. O embasamento resistivo, de resistividade variando entre 800 a 2000 Ωm, apresenta profundidades que variam entre 2,5 km a 4 km. Vale ressaltar que na região sudoeste do perfil, entre as estações 01 a 22, observa-se um condutor de resitividade variando entre 0.5 a 1Ωm, cortando o embasamento geoelétrico. A figura 3 mostra o modelo de resistividade em uma seção horizontal para a profundidade de 4km. Observa-se que esse condutor se estende lateralmente entre as estações 1, 20, 4 e 27.

A Figura 4 apresenta a estimativa da distribuição vertical de temperaturas na crosta terrestre. Observa-se que a temperatura aumenta gradativamente com a profundidade, e na região de interesse, entre 4 e 8 km, as temperaturas ultrapassam 80℃.

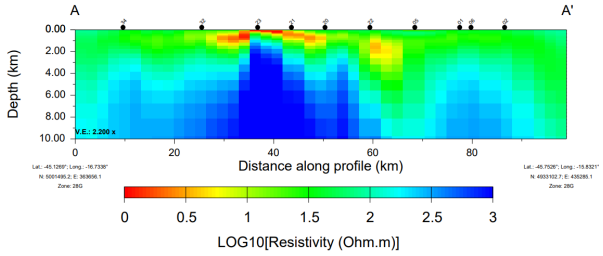

Figura 2: Seção Transversal ao longo de um perfil mostrando a distribuição de resistividade obtida a partir da inversão 3D dos dados MT.

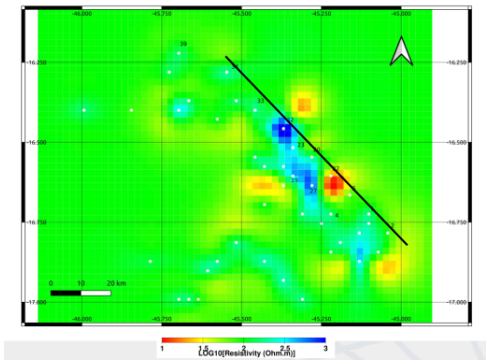

Figura 3: Seção horizontal mostrando a distribuição de resistividade para a profundidade de 4 km obtida a partir da inversão 3D MT.

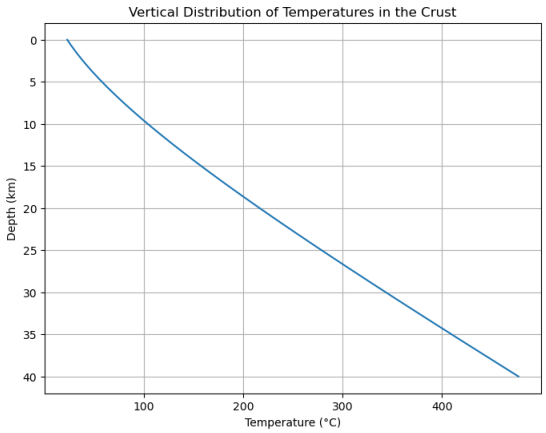

Figura 4: Distribuição vertical de temperaturas da crosta para a região de estudo.

Conclusões

Os resultados preliminares obtidos a partir da inversão 3D dos dados MT permitiu mapear o embasamento cristalino e o pacote sedimentar que caracteriza o Grupo Bambui. Estima-se que a profundidade do embasamento cristalino na área de estudo varia de 2,5 a 4,0 km.

A inversão 3D ressaltou uma anomalia condutiva no embasamento entre as estações 1 e 22. Os estudos de Solon et al. [2015] sugerem que essa anomalia pode ter

relação com um antigo canal coincidente com a posição do atual Rio Paracatu. No entanto, pesquisas geotérmicas mais recentes identificaram possíveis alvos para recursos geotérmicos na mesma região (Vieira [2015]).

Comparações do resultado da inversão 3D MT e mapa de distribuição vertical de temperaturas revela uma correlação espacial significativa entre a anomalia condutiva, e a presença de temperaturas maiores que 80℃ em profundidades entre 4 e 8 km. De acordo com a faixa classificação de temperaturas no cenário mundial (Lacasse et al. [2022]) e estudo feito sobre a avaliação de recursos geotérmicos na América do Sul (Vieira and Hamza [2019]), essa anomalia condutiva pode estar associada a um recurso de rocha quente e úmida (HWR).

Estudos regionais (Vieira [2015] e Alexandrino [2008]) mostram essa distribuição espacial de recursos do tipo baixa entalpia para região da área estudada, através de mapas de fluxo e gradiente geotérmico. As informações presentes nesses estudos, permitiu uma melhor compreensão das variações regionais deste possível sistema geotérmico não convencional.

References

C. Alexandrino and V. Hamza. Estrutura termal da litosfera nos segmentos cratônicos de salvador e são francisco. 01 2007. doi: 10.3997/2214-4609-pdb.172.SBGF0180$_0$7.

C.H. Alexandrino. *Campo termal da província estrutural São Francisco e faixas móveis adjacentes*. Tese de doutorado em geofísica, Observatório Nacional, 2008.

Fernando Alkmim and M.A. Martins-Neto. A bacia intracratônica do são francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *Geologia e Recursos Naturais*, pages 9–30, 01 2001.

F.F.M. Almeida. O cráton do são francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7:285–295, 1977.

O.P.G. Braun, U. Mello, and H. Della Piazza. Bacias proterozóicas brasileiras com perspectivas exploratórias para hidrocarbonetos. in: Raja gabaglia, g.p. milani, e.j. (eds) origem e evolução de bacias sedimentares. *Petrobras/SEREC/CEN-SUD, Rio de Janeiro, Brazil*, pages 115–132, 1990.

J.B. Curto and et al. The role of airborne geophysics for detecting hydrocarbon microseepages and related structural features: The case of remanso do fogo, brazil. *Geophysics*, 77:B35–B41, 2012.

G.D. Egbert and A. Kelbert. Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophysical Journal International*, 189(1):251–267, 2012. ISSN: 1365-246X. doi: 10.1111/j.1365- 246X.2011.05347.x.

Suze Nei Pereira Guimarães, Elias Martins Guerra Prado, Fábio Pinto Vieira, Christian Michel Lacasse, Nina da Silva Rocha, Beatriz Lessa de Jesus, and Oderson Antônio de Souza Filho. Updated mapping of terrestrial heat flow in brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 113:103627, 2022. ISSN 0895-9811. doi: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103627.

Cizia Hercos, Marcelo Martins-Neto, and André Danderfer. Arcabouço estrutural da bacia do são francisco nos arredores da serra da água fria (mg), a partir da integração de dados de superfície e subsuperfície. *Revista Brasileira de Geociências*, 38:197–212, 06 2008. doi: 10.25249/0375-7536.2008382S197212.

A. Kelbert, N. Meqbel, G. Egbert, and et al. Modem: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Computers Geosciences*, 66:40–53, may 2014. ISSN: 0098-3004. doi:10.1016/j.cageo.2014.01.010.

Christian Michel Lacasse, Elias Martins Guerra Prado, Suze Nei Pereira Guimarães, Oderson Antônio de Souza Filho, and Fábio Pinto Vieira. Integrated assessment and prospectivity mapping of geothermal resources for egs in brazil. *Geothermics*, 100:102321, 2022. ISSN 0375-6505. doi: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102321.

E M. Meister and et al. Geophysical and geological evidence of precambrian evaporites within western são francisco basin - a working hypothesis for gas and oil exploration to unveil an earth's secret of central brazil. *SEG Global Meeting Abstracts :*, pages 496–501, 2007. https://doi.org/10.1190/sbgf2007-098.

N. Meqbel, G. Egbert, P. Wannamaker, and et al. Deep electrical resistivity structure of the northwestern u.s. derived from 3-d inversion of usarray magnetotelluric data. *Earth and Planetary Science Letters*, 402:290–304, 2014. doi: 10.1016/j.epsl.2013.12.026.

C. P. Pinto and M. A. Martins-Neto. *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. 2001. ISBN 85-88618.02-8.

J.L. Porsani. Estudo magnetotelúrico na bacia do são francisco. *Final Report, Cenpes/ Susep/Segef*, 57, 1993.

J.L. Porsani and S.L. Fontes. Estrutura geo-elétrica da bacia do são francisco pelo método magnetotelúrico. *Simpósio sobre o Cráton do São Francisco*, 1:173–175, 1993.

J.L. Porsani and S.L. Fontes. O método magnetotelúrico aplicado a bacia do são francisco, minas gerais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19:145–154, 2001.

A. Prinzhofer, I. Moretti, and et al. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a brazilian h2-emitting structure. *Int. J. Hydrogen Energy*, 44:5676–5685, 2019.

P.V. Romeiro-Silva, P.C.and Zalán. Contribuição da sísmica de reflexão na determinação do limite oeste do cráton do são francisco. *SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO*, 3, 2005.

F.F. Solon, S. L. Fontes, and M. A. Meju. Magnetotelluric imaging integrated with seismic, gravity, magnetic and well-log data for basement and carbonate reservoir mapping in the são francisco basin, brazil. *Petroleum Geoscience*, pages 2013–013, 2015. ISSN: 1354-0793, 2041-496X. doi:10.1144/petgeo2013-013.

L. B. Texeira, M. Martins, and O. P. G. Braun. Evolução geológica da bacia do são francisco com base em sísmica de reflexão e métodos potenciais. *Anais do II Simpósio Sobre o Cráton de São Francisco: Evolução tectônica e*

metalogenética do São Francisco cráton, pages 179–181, 08 1993.

Fábio Vieira and V. Hamza. Assessment of geothermal resources of south america - a new look. *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applications*, 2:46–57, 03 2019. doi: 10.31214/ijthfa.v2i1.32.

Fábio Vieira, Suze Guimarães, and V. Hamza. Updated assessment of geothermal resources in brazil. pages 480–485, 08 2015. doi: 10.1190/sbgf2015-095.

F.P. Vieira. Energia geotérmica de media e alta entalpia no brasil: Avaliações de recursos e perspectivas de aproveitamento. *ON/MCTI*, pages 2015–257, 2015.

Ji Yang Wang and et al. Seismological press beijing. *Geothermics in China*, 1996.