



## Aplicação do método eletromagnético na prospecção de aquíferos fissurais: Modelagem numérica e teste de campo em Paulistana-PI

Felipe L. Cavalcante<sup>1,2</sup>, Pedro H. S. Chibane<sup>1,3</sup>, Carlos A. Mendonça<sup>1</sup>, Oderson Souza Filho<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IAG/USP, <sup>2</sup>PIBIC-CNPq, <sup>3</sup>Convênio IAG/USP-CPRM/SUREG-SP, <sup>4</sup>CPRM-SUREG-PR

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI 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.*

### Abstract

Fissural aquifers are important groundwater resources in crystalline terrains, especially in regions with arid or semi-arid climate. This is the case of the eastern portion of the Piauí State, included in what has been termed as “drought polygon” in government policies to alleviate economic and social problems caused by water shortage in the Brazilian Northeastern region. Here we present a test-field study to evaluate fracture detection from electromagnetic slingram data. An experimental profile was achieved at Paulistana-PI and interpreted with thin sheet models. Our results provide basic guidance to interpret field data to locate and characterize aquifer properties (dip, conductance, extension) according to thin sheet models for fissural aquifers. We highlight the importance of the profile extension in recognizing full EM responses, necessary to better estimate fracture dip and extension, and with thus better evaluate places for well location.

### Introdução

O nordeste do Brasil apresenta áreas com clima semiárido nas quais a busca por recursos hídricos subterrâneos para o abastecimento público ou demanda agroindustrial é de suma importância (Brandão et al., 2010). O município de Paulistana com área de 1587,58 km<sup>2</sup> e 2.429 habitantes (Censo 2000 IBGE) está inserido no polígono das secas. Sua precipitação pluviométrica média é de 500 mm (IBGE, 1977) e, por situar-se em área de granitos e gnaisses do embasamento cristalino (de Aguiar, 2004), a importância da prospecção de aquíferos fissurais faz-se ainda mais crítica.

Em áreas de embasamento cristalino os recursos hídricos subterrâneos são encontrados em descontinuidades rúpteis, que formam uma malha interconectada, com distribuição irregular na superfície e em profundidade. A profundidade dos poços raramente excede a uma ou duas centenas de metros, pois, em geral, as fraturas em níveis mais profundos possuem menor capacidade de armazenamento e grau de conectividade.

Terrenos com rochas cristalinas são em geral muito resistivos, mas as fraturas preenchidas com água podem ser tratadas como alvos condutivos (Telford et al, 1990). Por apresentar geometria aproximadamente planar, podemos representar fraturas (e zonas fissuradas) pelo modelo de lâmina fina condutora. Neste modelo, a espessura e a condutividade estão representadas por um parâmetro composto, expresso pelo produto dos mesmos. Este produto tem unidade de condutância elétrica (siemens) e, por isso, se denomina, condutância da fratura. Este parâmetro é muito importante ao se analisar a detectabilidade de uma fratura, uma vez que exprime a magnitude do sinal geofísico esperado em um levantamento.

Na prospecção de aquíferos fissurais tem-se utilizado sensoriamento remoto para mapear descontinuidades favoráveis ao armazenamento de água subterrânea (Pinéo, 2005), métodos geofísicos integrados para elaboração de modelos hidro geológicos (de Lima, 2010), VFL (*Very Low Frequency*) para identificação de aquíferos em áreas inundáveis (do Nascimento et al, 2013), GPR (*Ground Penetration Radar*) e eletroresistividade na localização de fraturas e determinação de espessura do manto de alteração (de Pádua et al, 2013).

O Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) colabora com as medidas emergenciais do Governo Federal para diminuir os efeitos da seca (Galvão, 2013). Em Paulistana, o CPRM realizou locações de poços em três comunidades. Este trabalho trata do levantamento experimental realizado no distrito de Pedra, coordenadas 8°12'52.09”S 41°23'04.11”W (*Figura 1*), no domínio do Complexo de Santa Filomena, composto por rochas metamórficas (xisto, gnaisses, quartzito e mármore) de idade esteniana (de Aguiar, 2004).

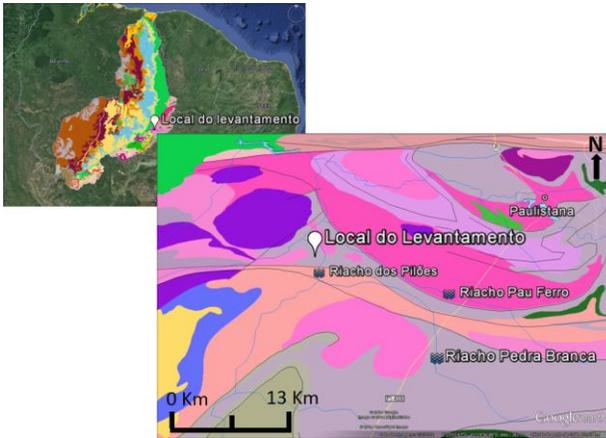


Figura 1- Localização do levantamento de Paulistana-Piauí, latitude  $8^{\circ}12'52.09''S$ , longitude  $41^{\circ}23'04.11''W$ . Domínio do Complexo de Santa Filomena, composto xisto, gnaiss, quartzito e mármore.

### Metodologia

O levantamento eletromagnético baseou-se no método *slingram*, que opera no domínio da frequência (FEM-*frequency electromagnetics*), utilizando duas bobinas; uma transmissora (Tx) e outra receptora (Rx). As bobinas são espaçadas de acordo com a profundidade a ser investigada, com cada medição sendo atribuída ao ponto médio entre as bobinas. A bobina Tx gera um campo magnético harmônico que ao incidir em alvos condutores induz correntes elétricas no substrato. As correntes secundárias, por sua vez, geram campos magnéticos que são medidos pela bobina Rx. Usando este princípio é possível determinar a posição e a geometria de alvos condutores ao longo de um perfil ou área de estudo.

O levantamento de campo em Paulistana-PI foi realizado com o equipamento PROMIS-10 (Iris Instruments), nas frequências de 440, 880, 1780, 3520, 7040 e 14080 Hz. As grandezas medidas são expressas em porcentagem em relação ao campo magnético primário gerado pela bobina Tx. São medidas as componentes x, y e z do campo magnético secundário nas frequências consideradas, assinaladas como Hx, Hy e Hz. A separação entre as bobinas foi de 100 m, ao longo de um perfil de 160 m. Os dados medidos foram analisados na forma de perfis (componentes em fase e em quadratura) e no formato de pseudo-seção, discutidos a seguir.

### Modelagem Numérica

A modelagem numérica teve como objetivo caracterizar a resposta eletromagnética de uma fratura em função dos parâmetros geométricos (mergulho, profundidade, extensão) e elétricos (condutância). Escolhemos um modelo de referência, avaliamos a forma e valores da resposta gerada e em seguida alteramos cada parâmetro do modelo gerando novas respostas. Esta abordagem permite reconhecer como a resposta eletromagnética se altera em função dos parâmetros que caracterizam a fratura (profundidade, mergulho, extensão e condutância). Para determinar a resposta dos vários modelos de fratura utilizamos o programa EMIGMA (PetRos Eikon), mais especificamente seu algoritmo

EikPlate, baseado em modificações do trabalho de Peter Anan, de 1980. O resultado da modelagem é expresso em grandezas comparáveis àquelas medidas em levantamentos reais.

Na (Figura 2), a profundidade H representa a espessura da camada de cobertura (*overburden*). O parâmetro de extensão (L) tem importância na avaliação do potencial hidro geológico da fratura, pois quanto maior o seu valor, maior a chance da fratura interceptar fraturas secundárias. A inclinação da fratura ( $\alpha$ ) é importante na locação de poços para interceptá-la em níveis mais profundos já que níveis mais rasos são mais comprometidos em estiagens prolongadas.

Os modelos considerados (Figura 2) tem como modelo de referência uma lâmina com  $H=5\text{ m}$ ,  $L=50\text{ m}$ ,  $C=1\text{ S}$  e  $X=120\text{ m}$ . A resposta deste modelo é mostrada como % da razão da componente em fase pelo campo total, para as inclinações de  $20^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ . Para  $\alpha=20^{\circ}$ , apresentamos também as variações na resposta eletromagnética decorrentes de perturbações nos valores de condutância ( $C=0,8\text{ S}$  e  $1,2\text{ S}$ ) e de profundidade ( $H=5\text{ m}$  e  $10\text{ m}$ ).

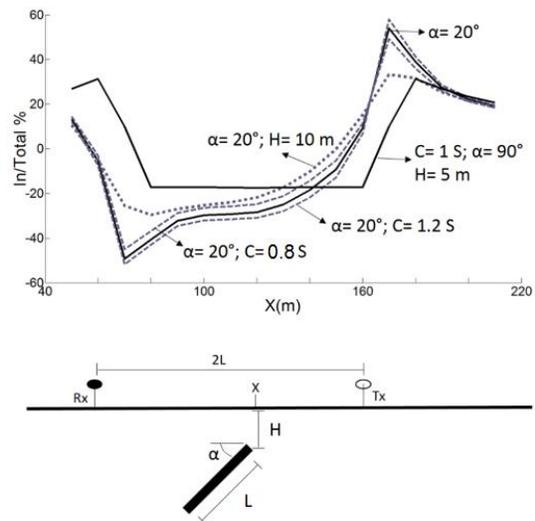


Figura 2 – Representação esquemática de uma fratura e sua resposta eletromagnética (em fase), expressa em porcentagem do campo total para a mesma frequência de 7040Hz. H=profundidade do topo da fratura; L=extensão ao longo do mergulho;  $\alpha$ = mergulho da lâmina; C=condutância elétrica (siemens). Bobinas receptora (Rx) e transmissora (Tx) com separação  $2L$ . A projeção do topo da lâmina na posição x representa o traço da fratura, tal como representado em mapas geológicos.

O parâmetro de condutância expressa, de forma combinada, duas características do aquífero; primeiro sua espessura, que está relacionada com a capacidade da fratura (ou zona de fissuras) em armazenar um maior volume de água. Segundo, relaciona-se à qualidade da água já que valores mais altos de condutância podem indicar águas mais salgadas, que podem comprometer sua utilização sem tratamento prévio. Para estimativas de condutância, utilizamos uma espessura média de 1m para a zona de fratura, porosidade de 0.5 (50%) e

condutividade da água de  $9230 \mu\text{S}/\text{cm}$ , valor presente na maioria dos poços com base em de Aguiar (2004). Nestes termos, visando apenas um valor de referência, a condutância seria da ordem de  $0,9 \text{ S}$ , assumindo dependência conforme a lei de Archie (Telford et al., 1990). Na modelagem empregamos valores entre  $0,8$  e  $1,2 \text{ S}$ .

A modelagem numérica mostra aspectos comuns na resposta eletromagnética de uma fratura com o método slingram. A posição do perfil em que a resposta tem maior amplitude corresponde às posições em que pelo menos uma das bobinas (Tx ou Rx) encontra-se nas proximidades da fratura. Para lâminas verticais a resposta é simétrica em relação à fratura (Figura 2) e, à medida que  $\alpha$  diminui, essa simetria é perdida. Variações nos parâmetros H, C e L causam variações na amplitude, mas não alteram o padrão de resposta.

### Estudo de caso

Utilizando padrões reconhecidos na modelagem numérica, interpretamos os resultados do perfil medido em Paulistana, PI (Figura 3). Como ponto de partida, identificamos pontos característicos (I, II e III) na figura que assinalam a transição de valores negativos para positivo na resposta eletromagnética.

Ressalta-se no perfil da Figura 3 que apenas uma transição é observada mostrando que, por questões logísticas de terreno, o perfil de campo não foi suficientemente longo para identificar as duas transições esperadas com base nas modelagens. Não cobrindo as duas transições características da anomalia eletromagnética, tal como aparecem na (Figura 4b e 4c), torna-se inviável analisar a simetria da resposta e, com isso, tirar informações a respeito do mergulho da lâmina. Identificamos outros picos negativos, porém de menor amplitude, e uma tendência iniciada em  $X=100$ , observada nas frequências de  $7040$  e  $14080 \text{ Hz}$  que são mais sensíveis. Contudo tais frequências podem estar identificando alguma feição ou até mesmo sofrendo influência externa já que não notamos correspondência nas demais frequências. Desse modo optamos por não considerar essas formas na interpretação.

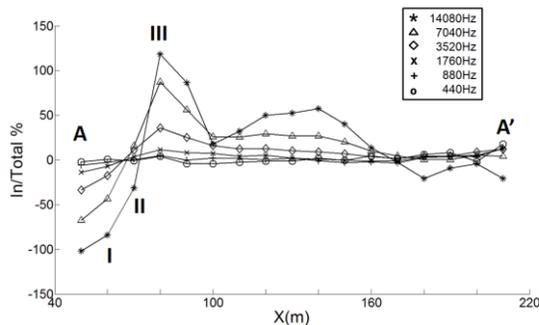


Figura 3: Resposta eletromagnética do perfil experimental realizado em Paulistana-Piauí. As medições foram realizadas no sentido de A para A', com as frequências de  $440$ ,  $880$ ,  $1780$ ,  $3520$ ,  $7040$  e  $14080 \text{ Hz}$  (das menores amplitudes para as maiores), com equipamento Promis-10. Separação entre bobinas de  $100 \text{ m}$ .

Para balizar nossa análise incluímos respostas de lâminas, inclinada (Figura 4b) e vertical (Figura 4c), também com pontos característicos assinalados. Como os pontos I, II e III podem ser identificados para os dois modelos de lâmina, concluímos que, nas condições consideradas, não é possível tecer inferências sobre o mergulho da fratura. Não vemos, entretanto, limitações para posicionar o traço da fratura, pois, baseado na resposta de lâmina fina, a sequência de pontos característicos aparece quando pelo menos uma das bobinas encontra-se na proximidade do condutor (no caso a bobina Rx).

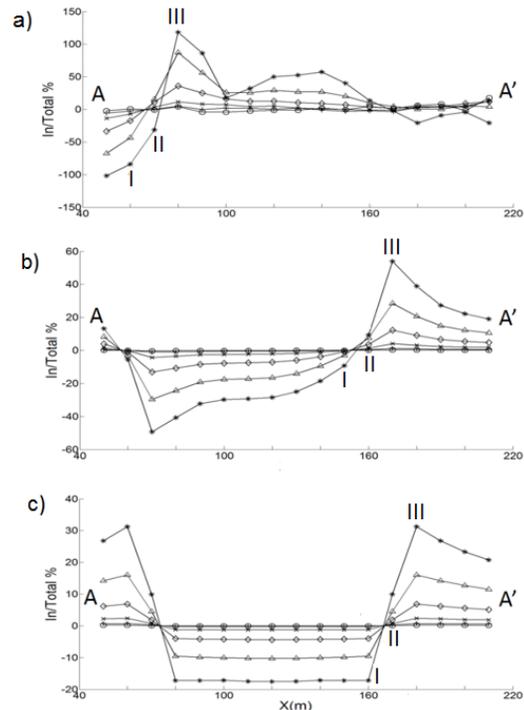


Figura 4: a) Dados eletromagnéticos (EM) do levantamento experimental em Paulistana, PI; b) resposta EM para modelo de lâmina com  $H=5 \text{ m}$ ,  $C=1 \text{ S}$ ,  $\alpha=20^\circ$ ; c) resposta EM para modelo de lâmina com  $H=5 \text{ m}$ ,  $C=1 \text{ S}$ ,  $\alpha=90^\circ$ .

Nas respostas apresentadas nas (Figuras 4b e 4c), cujos topos das lâminas foram posicionados em  $X=120 \text{ m}$ , verificamos que esses se encontram respectivamente  $40$  e  $50 \text{ m}$  antes dos pontos característicos "II" ( $X=160 \text{ m}$ ,  $X=170 \text{ m}$ ). Com base nesse argumento e verificando que o ponto característico "II" da (Figura 3) encontra-se na posição  $X=70 \text{ m}$ , posicionamos o traço relativo à possível fratura  $45 \text{ m}$  atrás ( $X=25 \text{ m}$ ) conforme visto na (Figura 5).



Figura 5 – Posicionamento da fratura no levantamento de Paulistana. Perfil A-A do levantamento eletromagnético (slingram) e posições das medições, traçado (linha vermelha) inferido para o condutor correspondente à transição de negativo para positivo na resposta eletromagnética (45 m a partir do ponto II).

Para efeito de ilustração, apresentamos a pseudo-seção de resistividade (Figura 6) obtida a partir dos dados brutos, componente em fase. A pseudo-seção é obtida apresentando-se os dados em função do inverso do quadrado da frequência para cada ponto de medida que, por interpolação, estabelece uma relação de continuidade lateral. A pseudo-seção é útil na interpretação de modelos de camadas, entretanto, para o teste realizado nota-se que a pseudo-seção não reconhece a presença do condutor externo ao perfil e, para comprometer a análise, inclui distorções que equivocadamente poderiam ser interpretadas como fraturas. Este exemplo ilustra as limitações da técnicas de pseudo-seções em terrenos fissurados, sugerindo que a interpretação seja feita com o modelo de lâmina.

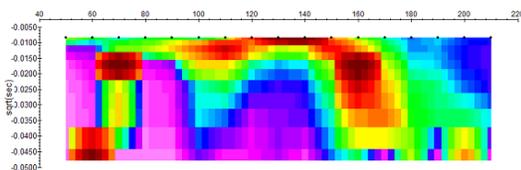


Figura 6 – Pseudo-seção obtida a partir dos dados brutos em fase mostrados na Figura 3.

### Discussão e Conclusões

Os resultados da interpretação de dados do perfil experimental realizado em terreno cristalino em Paulistana-PI mostram a importância da extensão do perfil para identificar os dois lobos da resposta EM esperada em fraturas. Não se identificando os dois lobos, não se pode caracterizar a simetria da resposta e, com isso, obter informações de mergulho. Na exploração de aquífero fissural o mergulho da fratura parece-nos de grande relevância na locação de poço e na escolha de alvos. Para a locação de poço, o mergulho deve ser levado em conta para que se possa interceptar a fratura em níveis mais profundos, dentro das possibilidades da técnica de perfuração. A opção por fraturas verticais ou

sub-verticais podem ter maior interesse prospectivo, pois podem atingir níveis mais profundos, interceptando fraturas secundárias do sistema aquífero.

Destaca-se também a relevância da condutividade da fratura, cujos valores alteram a amplitude das anomalias mas não a sua forma. Porém, por levar em conta a condutividade da água, ela pode trazer informações importantes à respeito da salinidade da água sendo, dessa forma, alvo de estudos mais aprofundados na continuidade do trabalho.

### Agradecimentos

Ao PIBIC-CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica (FLC). Ao programa de cooperação IAG/USP-CPRM/SUREG-SP.

### Referências

- Brandão, R. de L., Pfaltzgraff, P.A. dos S., Torres, F.S. de M., 2010. Geodiversidade do Piauí. CPRM-Recife, Brasil, cap. 8, pg.77-86.
- de Aguiar, R. B., 2004. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado do Piauí: diagnóstico do município de Paulistana: R. B. de Aguiar, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, [ed]-Fortaleza.
- de Lima, O. A. L., 2010. Estruturas Geométrica e Hidroquímica do Sistema Aquífero Cristalino da Bacia do Alto do Rio Curaçá, Semiárido da Bahia. RBGf, Brasil 28(3): 445-461
- de Pádua, A. I., Borges, W. R., da Cunha, L. S., Lago, A. L., Campos, J. E. G., 2013. Integração de Dados Geofísicos para a Identificação de Zonas Fraturadas, SBGf, Brasil.
- do Nascimento, C. T. C., de Almeida, A., Silva, R. R., de Sousa, V. X. S., 2010. Identificação de Aquífero Fissural por Meio de VLF, SBGf, Brasília, Brasil.
- Galvão, M. J. da T. (org.), 2013. Locações de poços tubulares em rochas cristalinas no semiárido brasileiro: Relatório Integrado. Recife: CPRM. SUREG- RE, 80 p.; il. (Programa de Convivência com a Seca).
- Geografia do Brasil - Região Nordeste, 1977. IBGE-Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, SERGRAF, Rio de Janeiro.
- Pinéo, T. R. G, 2005. Integração de Dados Geofísicos, Geológicos e de Sensores Remotos Aplicados à Prospecção de Água Subterrânea em Meio Fissural (Distrito de Juá, Irauçuba/CE). UFCE, Mestrado em Geologia, Fortaleza, Brasil.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990. Applied Geophysics. Cambridge University Press, UK. Cap(7).