



Caracterização Geoelétrica do Sudeste da Bacia do Parnaíba: Correspondência Litoestratigráfica e Implicações Hidrogeológicas

José P.R. Lima*, Sergio L. Fontes*, Abel G. Carrasquilla⁺ e Maxwell A. Meju[#]

*Observatório Nacional, Rio de Janeiro-RJ, Brasil/ ⁺LENEP/UENF, Macaé –RJ, Brasil/ [#]University of Leicester, UK.

Resumo

Um conjunto de métodos geoeletrômagnéticos foi empregado na parte sudeste da bacia do Parnaíba para a investigação de aquíferos profundos. Diversas sondagens elétrica vertical (SEV), eletromagnética transiente (TEM) e magnetotelúrica (MT) foram realizadas ao longo de um perfil de 180 km, que atravessa importantes feições estruturais e se estende até a borda cristalina sudeste da bacia. Os dados geoeletrômagnéticos foram invertidos ‘conjuntamente’ utilizando esquema de inversão 1-D, apresentando a distribuição da resistividade elétrica em profundidade para cada sondagem. O uso integrado de TEM/MT permitiu corrigir os dados MT de “static shift” e melhor definir as estruturas rasas e profundas. Resultados da inversão 2-D dos dados MT permitiu mapear a distribuição lateral dos aquíferos e identificar as principais feições estruturais que influenciam o regime hidrodinâmico da bacia, apresentando boa concordância com a interpretação dos dados aeromagnéticos. Os resultados obtidos evidenciam a importância da utilização de métodos geoeletrômagnéticos integrados como meio de se obter informação fundamental para estudos hidrogeológicos em bacias sedimentares.

INTRODUÇÃO

A Bacia do Parnaíba está localizada na parte nordeste do Brasil e tem a forma oval, se estendendo cerca de 1000 km na direção nordeste-sudoeste e 800 km na direção noroeste-sudeste, abrangendo os Estados do Piauí, Maranhão e partes adjacentes de Tocantins, Pará, Ceará e Bahia, ocupando uma área de aproximadamente 600.000 km² (Fig. 1a). Esta bacia encontra-se instalada na porção ocidental do nordeste da Plataforma Sul – Americana, entre as faixas de dobramentos que bordejam os crátons de São Francisco, São Luís e Amazonas, sendo limitada por três arcos: Arco de Ferrer-Urbano Santos, Arco do Tocantins e Arco de São Francisco. O esboço estrutural da região é tridimensional, existindo entretanto uma estratificação geológica dominante, que sofre interrupções devido a falhamentos e intrusões ígneas ocasionais. A arquitetura do embasamento é dominada por lineamentos localizados e de larga escala e por feições grabeniformes localizadas. O embasamento (composto por arenitos róseos a violáceos, ardósias, calcários, xistos, granitos e gnaisses) está diretamente preenchido por uma seqüência alternada de formações areníticas comumente grosseiras (conglomerados, rochas sedimentares e seixos de quartzo de origens fluvial, deltaico, glacial ou fluvioglacial e clásticos finos (folhelhos marinhos/lacustres e siltitos ou depósitos aeólicos). A arquitetura litológica é então potencialmente favorável à ocorrência de diversos aquíferos.

Nas partes leste e sudeste da bacia, a partir de estudos aeromagnéticos e gravimétricos, geologia de superfície e utilização de sensoriamento remoto (fotos aéreas e imagens de satélites), foram inferidas as principais feições estruturais: o Lineamento Transbrasiliano, os lineamentos regionais Manoel Emídio - Cococi e Palmeiras – S. Julião e a estrutura grabeniforme S. Raimundo Nonato (Fig. 1). A influência destas estruturas lineares na ocorrência e armazenamento de água subterrânea na região, apesar de evidente, ainda não é bem estabelecida. A parte oriental da Bacia do Parnaíba, abrangendo a região leste e sudeste do Estado do Piauí e partes dos Estados do Ceará e Bahia, enquadra-se na classificação de clima quente tropical, apresentando-se como uma região semi-árida, caracterizada por temperatura médias muito elevadas, variando de 23° C a 27° C (Frischkorn e Santiago, 1992). Tem um período de insolação anual muito longo, com precipitação concentrada em uma única estação úmida e com uma estação seca bem caracterizada, apresentando uma pluviometria média anual superior a 1500 mm, com máximas da ordem de 1700 mm e mínima de 600 mm, ocorrendo na zona mais árida (CPRM, 1978). Em relação à ocorrência de águas subterrâneas, constata-se que a quantidade de água meteórica anualmente disponível para a infiltração é em média muito pequena, e a infiltração apresenta-se irregular anualmente e em determinado período de anos, ocasionando condições desfavoráveis sobre o potencial do aquífero, principalmente durante os longos períodos de estiagem. Os aquíferos sedimentares de níveis superiores e aquíferos em fraturas em rochas cristalinas oferecem suprimento captados por poços relativamente rasos (entre 50 m e 100 m) para pequenas comunidades, que sofrem flutuações sazonais consideráveis, resultando em deficiência no suprimento. Os aquíferos regionais profundos fornecem suprimento mais estáveis, por não sofrer forte influência climática. Por outro lado, podem ser considerados fontes não renováveis por terem sido acumulados lentamente durante o Pleistoceno (Frischkorn e Santiago, 1992). Trabalhos de hidrodinâmica na Bacia do Parnaíba realizados por Zemruscki e Campos (1987) procederam ao estudo de parâmetros geotérmicos da Bacia do Parnaíba e associaram os resultados com a interpretação hidrodinâmica proposta por Campos (1985, *apud* Zemruscki e Campos, 1987), com o objetivo de obter indicação de geração, movimentação e armazenamento de hidrocarbonetos. Em seu trabalho, a partir da movimentação de fluidos em subsuperfície e pela localização dos efeitos direcionais, foram deduzidas as áreas de recarga de fluidos. A abordagem mais usual nos estudos de hidrogeologia na região emprega informações geológicas e de poços de exploração, sendo que a aplicação de métodos geofísicos é bem pouco utilizada.

Os métodos geofísicos de sondagem em profundidade, indutiva e de resistividade galvânica, são regularmente usados em investigações de água subterrânea. Estudos geoeletrômagnéticos anteriores na região envolveram um pequeno número de levantamentos, utilizando os métodos de eletro-resistividade e audiomagnetotelúrico (AMT) escalar. Estes estudos foram capazes de resolver apenas aquíferos rasos e para a interpretação regional AMT foi usada inversão 1-D (Vitorello e Padilha, 1993). Entretanto, a estrutura do embasamento durante a evolução da Bacia tem influenciado a arquitetura dos sedimentos sobrepostos, e para melhor compreender esta influência se faz necessário uma interpretação baseada em inversão bidimensional, de tal modo que seja possível 'mapear' as feições estruturais existentes, e a distribuição lateral e em profundidade da litoestratigrafia ao longo do perfil. O modelo de partida para a inversão 2-D foi obtido a partir de interpretação 1-D integrada de conjuntos de dados de sondagem elétrica vertical (SEV) e eletromagnética (TEM, MT), obtidos nas estações do perfil. O uso integrado dos métodos TEM e MT foi usado recentemente para correção do efeito de "static shift" em dados MT e a interpretação integrada, incluindo o método SEV, tem sido empregada em estudos de água subterrânea rasa e profunda (Lima *et al.* 1997; Meju *et al.*, 1999).

Os dados foram adquiridos na forma de um perfil em duas campanhas, realizadas sucessivamente em 1995 e em 1996. Os resultados da primeira campanha estão apresentados em Meju *et al.* (1999), enquanto neste trabalho são apresentados os resultados da segunda campanha. A primeira parte do perfil tem extensão de 120 km e compreende nove estações MT e dezesseis estações TEM, com espaçamento médio de 10 km entre as estações. A segunda parte se estende por 180 km (de Itaueiras até São Raimundo Nonato), alcançando a borda cristalina sudeste da bacia, e compreende vinte estações MT e nove estações TEM com espaçamento entre as estações variando entre 5 km e 10 km.

HIDROGEOLOGIA

A Bacia do Parnaíba apresenta uma história geológica cuja evolução da sedimentação seguiu uma seqüência rítmica, propiciando a formação de aquíferos livres e confinados, a partir das bordas cristalinas em direção ao centro. A Bacia do Parnaíba contém sete aquíferos, com uma espessura total máxima de 1500 m. Estes aquíferos estão associados aos reservatórios de arenitos paleozóicos pertencentes às formações Ipu, Jaicós, Itaim, Cabeças, Poti e Piauí. Localmente a Formação Pimenteiras funciona também como aquífero, devido a presença de arenitos intercalados aos folhelhos. As formações Cabeças e Itaim são reservatórios de apreciável espessura e continuidade lateral, exceto no quadrante noroeste da bacia, onde encontram-se interdigitados a folhelhos. A grande incidência de diabásio na porção centro-leste da bacia limita a qualidade destes reservatórios. Os folhelhos das Formações Tianguá, Pimenteiras, Longá e anidritas das Formações Piauí e Pedra de Fogo atuam como selantes para os reservatórios. Os folhelhos da Formação Tianguá são os selantes potenciais para os reservatórios Ipu. Os arenitos da Formação Cabeças encontram-se associados às seqüências de folhelhos radioativos da formação Pimenteiras e não-radioativos da formação Longá, os quais atuam como seus principais selantes. As intrusivas básicas associadas ao Grupo Canindé também têm a capacidade de atuar como selantes.

Zembruski e Campos (1987), baseados em um mapa geológico esquematizado da bacia, como também em mapas de gradiente geotérmico, concluíram que o influxo de águas meteóricas para profundidade maiores é mais facilitado nas bordas leste e sudeste da bacia. Isto porque esta parte da bacia corresponde à área de maior extensão de afloramentos da seqüência siluriana até a permiana, favorecendo a ocorrência de dutos preferenciais (permeabilidade vertical e horizontal, fraturas, falhas, etc.) mergulho abaixo. Logo, pela borda leste há maior aporte (recarga) de fluidos meteóricos em direção ao depocentro da bacia, onde maiores temperaturas ocasionam aquecimento e convecção, e consequentemente ascensão dos fluidos para zonas superficiais de menores pressões. A Bacia do Parnaíba apresenta grande maturidade hidrodinâmica, o que implica em um regime hidrodinâmico centrípeto. Ou seja, as águas superficiais frias penetram pelas litologias aflorantes ao longo de quase toda a extensão leste e sul da bacia e são aquecidas quando alcançam profundidades maiores, em direção ao depocentro da bacia, com isto sofrem convecção e têm seu movimento de fluxo revertido e ascendem à superfície.

ESTUDOS GEOELETRÔMAGNÉTICOS

Para as medidas de sondagem elétrica vertical (SEV), foi empregada a configuração Schlumberger com comprimento entre os eletrodos de 100 m em todas as estações. Os dados TEM foram adquiridos usando as configurações "central-loop" e "coincident-loop", com comprimento lateral do "loop" de 50 m. Os dados MT foram coletados usando o comprimento de 100 m para os dipolos elétricos nas direções leste-oeste e norte-sul magnéticos, referidas como polarizações yx e xy respectivamente. O perfil forma um traçado que corta as principais feições da parte sudeste da bacia: os lineamentos Manoel Emídio - Cococi e Palmeiras - S. Julião e a estrutura grabenforme regional S. Raimundo Nonato que serve como fonte de água subterrânea para a cidade de S. Raimundo Nonato (Fontes *et al.*, 1997).

Para a análise comparativa de dados TEM e MT, foi usado um fator de relação de escala entre o tempo eletromagnético transiente (t) e o período de onda magnetotelúrico (T) em segundos, igual a $T = 3.9 t$ (Meju, 1998). Para a análise dos dados SEV e TEM a relação de escala aproximada descrita em Meju (1996).

Para as estações nas quais as curvas de sondagem MT de ambas as polarizações ortogonais são claramente paralelas e afetadas por "static shift", foi usado para a correção deste efeito os dados TEM obtidos empregando a configuração "central-loop". Para as estações em que as curvas MT são afetadas por "static shift" mas não apresentam paralelismo acentuado, o modo TM ('magnético transversal') - correspondente à polarização xy neste estudo, foi corrigido com base em dados TEM obtidos com a configuração "central-loop", e o modo TE ('elétrico transversal') - polarização yx, corrigido com base em dados TEM medidos com a configuração "coincident-loop". Este forma de correção foi considerada adequada para a inversão 2-D dos dados MT.

Para a inversão 1-D conjunta SEV-TEM-MT foi utilizado um esquema que inclui resultados provindos de investigações em poços exploratórios, dando peso considerável à informação geológica disponível. Para conseguir este objetivo foi

adotado o algoritmo 'estimacão tendenciosa não-linear' proposto por Meju (1994). Nesta metodologia, são analisados os resultados de inversões 'conjuntas' em uma estação de controle com informações de poço com o objetivo de compreender quais assinaturas geoeletricas corresponderiam às camadas da inversão e identificar quais vínculos geológicos adicionais seriam necessários no processo de inversão para aprimorar a identificação da litoestratigrafia. Para tal, foram utilizadas informações de descrições litológica, estratigráfica e de dados geofísicos de um poço profundo de exploração de hidrocarbonetos, localizado na mesma posição de uma estação pertencente à primeira parte do perfil realizada na campanha de 1995 (Fig. 2). A partir principalmente das informações de estratigrafia e resistividade, foi realizada uma primeira inversão integrada SEV-TEM-MT controlada com o intuito de associar os sinais geoeletrômagnéticos e os resultados obtidos da inversão com a estratigrafia conhecida da Bacia. Estas associações foram utilizadas para a interpretação estendendo os resultados de inversão às demais estações do perfil total, tornando possível identificar aspectos geológicos, estratigráficos e estruturais ao longo do perfil.

Para 'mapear' as feições estruturais ao longo do perfil, admitindo que o arcabouço estrutural apresenta-se como uma estrutura bidimensional, foi realizada uma inversão 2-D, empregando um esquema de inversão 2-D "ridge regression" usando 'Decomposição de Valor Singular Complexa' baseado em elemento-finito (Meju *et al.*, 1999). O processo de inversão foi iniciado com um modelo estrutural construído usando os resultados integrados 1-D de cada estação, incluindo portanto, as informações complementares provenientes de métodos de prospecção rasa. Os resultados de inversão 2-D foram analisados e apresentados na forma de um modelo de seção em corte, interpretado com enfoques hidrogeológico, estrutural e estratigráfico (Fig. 3), correlacionando-o com o posicionamento das principais feições estruturais obtido por interpretação de dados aeromagnéticos (Nunes, 1993).

CONCLUSÃO

A inversão conjunta dos métodos geofísicos SEV/TEM/MT mostrou-se eficiente para a investigação de aquíferos rasos e profundos da Bacia do Parnaíba. Efetivamente, esta inversão conjunta dos dados geoeletrômagnéticos, em associação com informações de litoestratigrafia e de dados de resistividade elétrica de poço, tornou eficaz a correlação entre os horizontes (camadas) geoeletrômagnéticos e os horizontes litoestratigráficos. O esquema de inversão 2-D empregado resultou em um modelo geoeletrico bidimensional que identifica com clareza a variação lateral das camadas estratigráficas e localiza as principais feições estruturais ao longo do perfil. Estas feições estruturais são identificadas no modelo geoeletrico, a partir de interpretação da ocorrência de falhas e de grabens (Fig.3). Trabalhos anteriores de hidrodinâmica na bacia mostram a importância da presença da Zona de Falhas Transbrasiliana na dinâmica do fluxo de fluidos. Este trabalho vem contribuir para um conhecimento maior acerca da dinâmica deste fluxo, visto que identifica a ocorrência de outros dutos preferenciais na parte sudeste da bacia, ou seja, as falhas associadas aos lineamentos magnéticos regionais e a presença do Graben de São Raimundo Nonato, que influenciam diretamente a hidrodinâmica e ocorrência de água subterrânea na região.

REFERÊNCIAS

- CPRM, 1978. Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba: Integração Geológico-Metalogenética. Recife, MME/DNPM/CPRM, v. 1, 177 p.
- Fontes, S.L., Meju, M.A., Lima, J.P.R., Carvalho, R.M., LaTerra, E.F., Germano, C.R. and Metelo, M., 1997. Geophysical investigation of major structural controls on groundwater distribution, north of Sao Raimundo Nonato, Piauí State: 5th Internat. Congr. Brazil. Geophys. Soc., Expanded Abstracts, 766-769.
- Frischkorn, H. & Santiago, M. M. F., 1992. O Paleoclima do Nordeste de Acordo com a Hidrologia Isotópica. ICID, Fortaleza, Ceará, 27 de Janeiro a 1^o de fevereiro, 1992.
- Lima, J.P.R., Fontes, S. L. and Meju, M. A., 1997. Regional VES-TEM/AMT hydrogeophysical surveys in the southeast margin of Parnaíba Basin, Brazil. UKGA - 21, 2nd-4th April 1997, University of Southampton, Southampton Oceanography Centre. Abstracts, Session2, EEM4, p.32.
- Meju, M.A., 1996. Geoelectromagnetics, geology and the environment: understanding electrical images of the subsurface: Bullerwell keynote lecture, 20th United Kingdom Geophysical Assembly, Newcastle-upon-Tyne, UK., April 1996.
- Meju, M.A., 1998. A simple method of transient electromagnetic data analysis: Geophysics, 63, 405-410.
- Meju, M A, Fontes, S.L., Oliveira, M.F.B., Lima, J.P.R., Uluggerli, E.U. and Carrasquilla, A.ª 1999. Regional aquifer mapping using combined VES-TEM-AMT/EMAP methods in the semiarid eastern margin of Parnaíba Basin, Brazil, Geophysics, vol. 64, n^o (March – April).
- Nunes, K.C., 1993. Interpretação Integrada da Bacia do Parnaíba com Ênfase nos Dados Aeromagnéticos, 3^o Congresso Internacional da Soc. Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Resumo Expandido, vol. 1, p. 152-157.
- Vitorello, I. and Padilha, A.L., 1993. Perfis de resistividade AMT: Contribuição ao reconhecimento estrutural da borda sudeste da Bacia do Parnaíba: Revista Brasileira de Geociências, 23, 81-91.
- Zembruski, S. G. & Campos, J. N. dos P., 1988. Comportamento Geotérmico Regional e Provável Movimentação de Fluidos na Bacia do Parnaíba, Maranhão. B. Geoci. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 2 (2/4): 133-145, abr./dez. 1988.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado com recursos do PADCTII (FINEP), CAPES e British Council. Agradecemos a participação de Carlos R.Germano, Emanuele F. La Terra e Ronaldo M. Carvalho, do Observatório Nacional, nas duas campanhas

de campo.

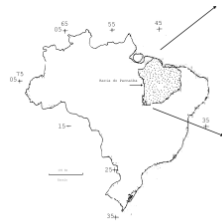


Fig. 1 – (a) Localização da Bacia do Parnaíba

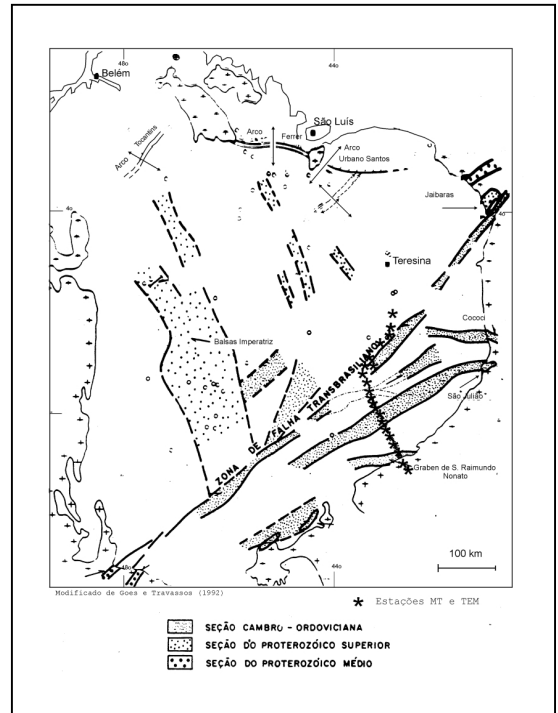


Fig. 1 (b) - Mapa de Estruturas Grabeniformes com a localização das estações MT/TEM (assinaladas com *). Modificado de Nunes, 1993

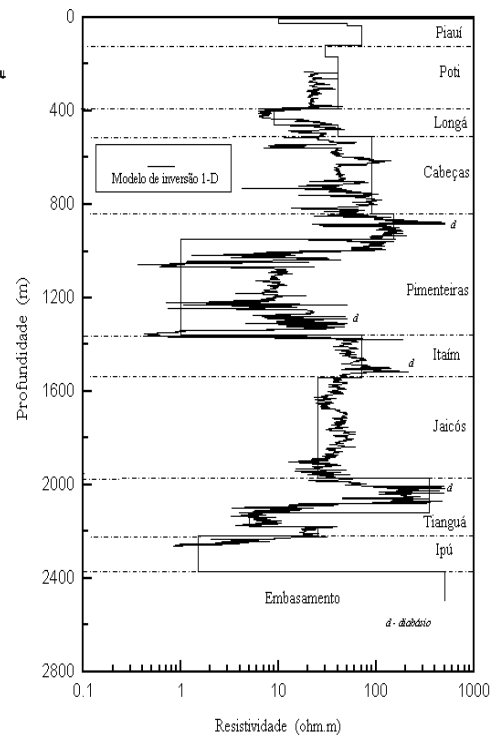
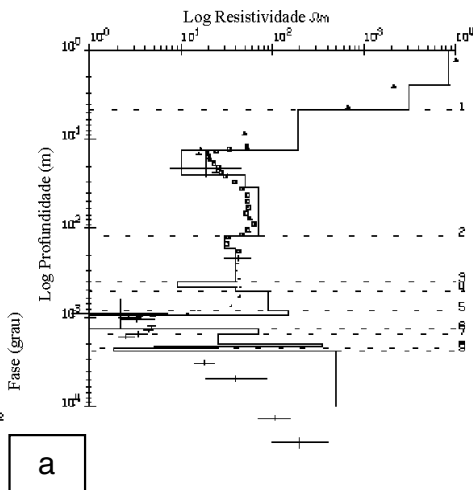
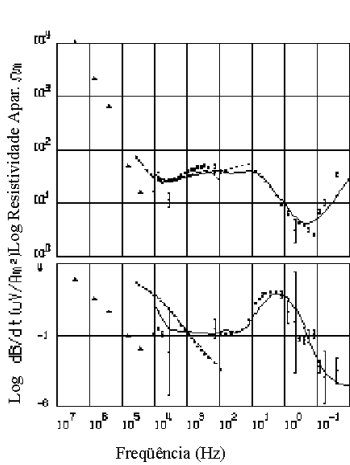


Fig. 2 (a) - Inversão 1-D conjunta de sondagens MT/TEM em poço próximo a cidade de Floriano, Piauí.

Fig. 2 (b) - Resultado da perfilagem elétrica do poço com inversão 1-D MT/TEM superposta e formações sedimentares.

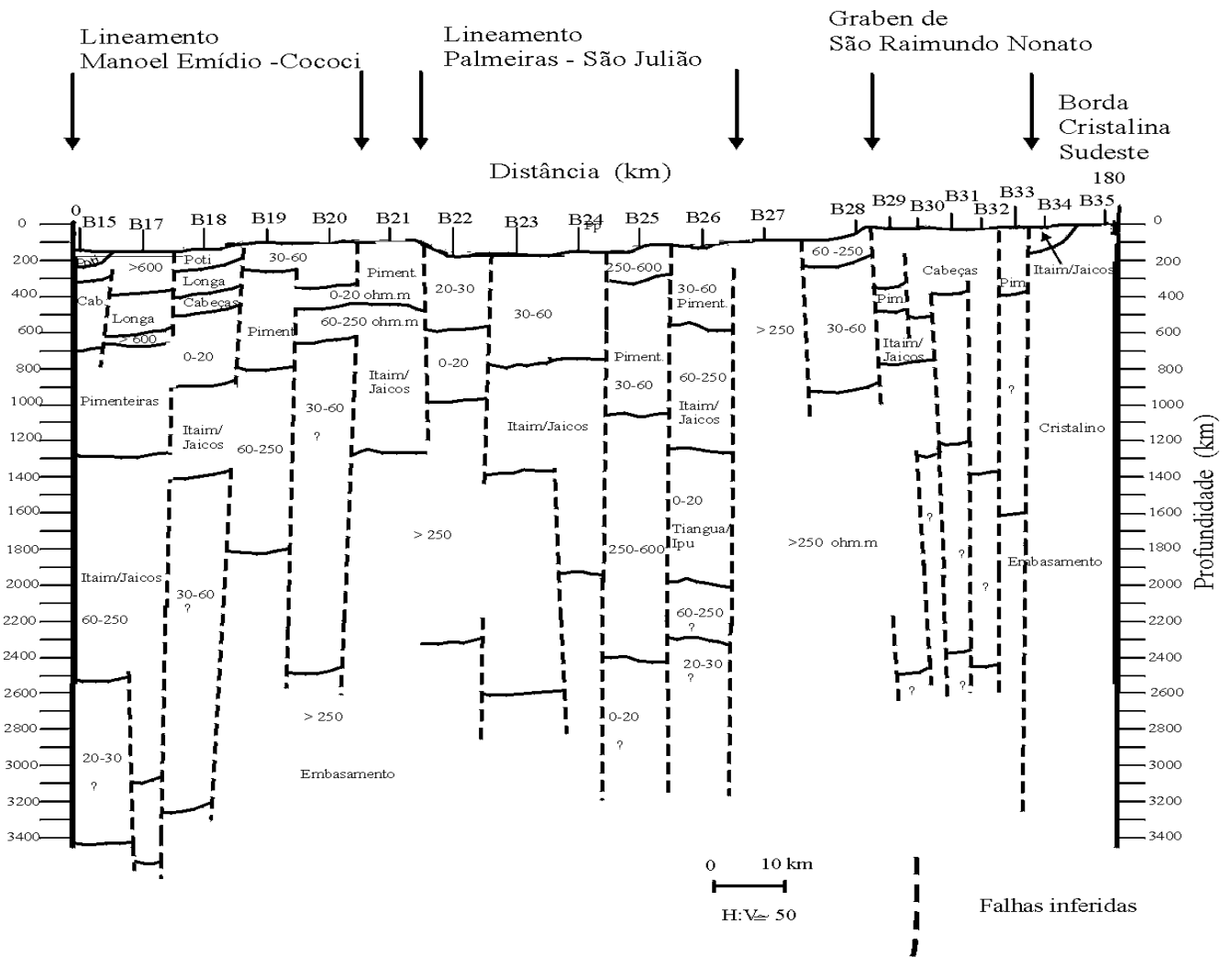


Fig. 3 – Interpretação Hidrogeológica do Modelo Geoeletrico 2-D .