

AVALIAÇÃO GEOFÍSICA (GPR, ER E VLF) DO SISTEMA AQÜÍFERO DO PLANALTO DO CAUÍPE - CEARÁ, BRASIL: RESULTADOS PRELIMINARES

David Lopes de Castro¹; Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco¹ &
Luciano Soares da Cunha¹

Abstract - A geophysical survey, including Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity (ER) and Very Low Frequency (VLF), was carried out for recognizing internal geometry in the aquifer system of the Cauípe Highland in the northern part of Ceará State, Brazil. This aquifer is formed by a fine sandy sedimentary cover underlined by weathered crystalline basement. Hydrogeological informations from wells indicate intensely weathered gneissic rocks between 5 and 7 m depth and a groundwater table about 5.5 m depth.

A vertical electric sounding (VES) and a GPR profile using 80 MHz center frequency antennas detected a 4.6 m thick sandy overburden and the interface between weathered and fresh basement up to 21 m depth. The top of the fresh gneiss is marked by a fractured zone which was identified in the GPR section, VES and VLF profile. Another GPR section was conducted using a 400 MHz center frequency antennas to improve more details about the uppermost portion of this aquifer. An irregular groundwater table could be observed about 1.2 m depth as well as three sedimentary layers with distinct electric properties. Several areas in the Cauípe Highland are already investigated with the same geophysical procedure to recognize the overall behavior of their aquifer system.

Palavras-chave - Métodos Geofísicos; Sistema Aquífero; Planalto do Cauípe - CE

INTRODUÇÃO

Métodos geofísicos de investigação rasa são uma importante ferramenta para o estudo dos recursos hídricos subterrâneos, sobretudo em regiões de escassos mananciais superficiais como é o caso do Nordeste do Brasil. A identificação de estruturas geológicas

favoráveis à acumulação de água subterrânea com o auxílio da Geofísica tem proporcionado um expressivo aumento no sucesso da perfuração de poços profundos produtores. Empresas especializadas em locação de poços profundos com base em dados geofísicos proliferaram nestes últimos anos em todo o Nordeste e, em especial, em Fortaleza, onde eletrorresistivímetros são fabricados e distribuídos para o Ceará e estados vizinhos.

Os métodos geofísicos mais consagrados em estudos hidrogeológicos no Nordeste Brasileiro são a eletrorresistividade (ER) e o VLF (Very Low Frequency). Apesar de algumas dificuldades operacionais, como a necessidade de introduzir eletrodos no solo, elaborados arranjos instrumentais e vários cálculos matemáticos, a ER popularizou-se principalmente pelo baixo custo dos equipamentos e pela ausência de outros métodos com um mesmo nível de precisão no estudo, sobretudo, de estratos horizontais. Porém, a evolução tecnológica dos métodos eletromagnéticos induzidos (EM e VLF), com equipamentos mais baratos e portáteis, tornou-os uma alternativa bastante viável frente à ER, principalmente em estudos de aquíferos do domínio fissural, onde o VLF tem sido aplicado com sucesso na localização de condutores tabulares em subsuperfície. Uma restrição destes métodos encontra-se na limitada profundidade de investigação, que pode atingir até 60 m, dependendo das propriedades eletromagnéticas do substrato geológico.

O método eletromagnético GPR (*Ground Penetrating Radar*) representa um expressivo ganho em resolução e detalhamento das feições geológicas de subsuperfície. Diferentemente da ER e VLF, que em cada estação de medida registra em um valor médio a resposta dos materiais terrestres, desde à superfície até a profundidade de investigação, ao campos eletromagnéticos naturais ou induzidos, o GPR consiste em uma técnica de imageamento da subsuperfície através de ondas eletromagnéticas geradas por pulsos elétricos irradiados e recebidos por antenas posicionadas em superfície. O uso desta técnica encontra aplicações nas mais diversas áreas da engenharia civil, geotecnia, meio ambiente, bem como em estudos de Sedimentologia, Estratigrafia de detalhe e Hidrogeologia. Na exploração mineral, a utilização do GPR tem-se mostrado como uma excelente ferramenta de apoio à geologia, principalmente associada ao mapeamento de depósitos aluvionares e à exploração de pedras ornamentais.

Este trabalho tem como objetivo principal a caracterização dos aspectos geométricos do sistema aquífero do Planalto do Cauípe, a 43 km a oeste de Fortaleza - CE, a partir da integração dos métodos geofísicos supracitados. A avaliação geofísica do aquífero consistiu de seções de GPR com antenas de 80 e 400 MHz, sondagem elétrica vertical (SEV) e

¹ Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto - Depto de Geologia, UFC. Campus Universitário do Pici, Bl. 913 - 60455-760, Fortaleza - CE. Tel.: (0xx85) 288-9878, E-mail: david@ufc.br e

perfil de VLF. Por fim, informações geológicas obtidas em cacimbas próximas aos perfis geofísicos foram incorporadas com o intuito de vincular os resultados do levantamento geofísico à realidade geológica local. Serão apresentados os resultados alcançados em uma das áreas-alvo selecionadas do Planalto do Cauípe, visto que o levantamento geofísico nas demais áreas encontra-se em fase de execução.

GEOLOGIA

O Planalto do Cauípe está situado na região litorânea norte do Estado do Ceará (Fig. 1) e insere-se no contexto geológico da Faixa de Dobramentos Jaguaribeanos de Brito Neves (1975). As rochas do embasamento precambriano, denominado Complexo Gnaíssico-Migmatítico, são constituídas por gnaisses variados, incluindo lentes de metarcóseos, anfíbolitos, quartzitos e calcários, além de migmatitos com estruturas diversas (Brandão, 1995).

Geralmente, os gnaisses são de coloração cinza clara, granulação fina a grossa, apresentando finas listras até espessas bandas félsicas intercaladas com máficas. Os minerais mais comuns são o quartzo, feldspato e biotita. No Planalto do Cauípe, as rochas desta unidade precambriana são recobertas pelos sedimentos cenozóicos do Grupo Barreiras e litorâneos de idade quaternária, compostos pelos campos de dunas e paleodunas, *beach rocks*, aluviões e solos areno-argilosos. Os gnaisses afloram parcialmente em alguns cortes de estrada (Fig. 2), em leitos de rios e em áreas de escavação de poços e cacimbas, e encontram-se intensamente intemperizados. No corte da estrada CE-020 (Fig. 2), a camada de embasamento intemperizado atinge pelo menos 4 m de espessura, não sendo observado o topo de rocha cristalina sã.

A fina cobertura sedimentar cenozóica caracteriza, em termos hidrogeológicos, um aquífero do tipo poroso. Suas espessuras variam de vários centímetros (Fig. 2) a poucas dezenas de metros. Cacimbas escavadas próximas ao levantamento geofísico alcançaram o embasamento cristalino intemperizado entre 5 e 7 m de profundidade, repousando sob sedimentos inconsolidados finos e de coloração acinzentada. Neste local, o embasamento é caracterizado por leuco-gnaisses levemente foliados, ricos em quartzo, feldspatos, muscovitas e pequenos grãos de biotita e granada. Sua granulometria é fina, e de coloração cinza esbranquiçada a amarelada. Encontram-se bastante intemperizados, quebradiços até pulverulentos. Afloramentos de rochas cristalinas sãs foram observadas apenas em pedreiras de granito algumas dezenas de quilômetros da área do levantamento.

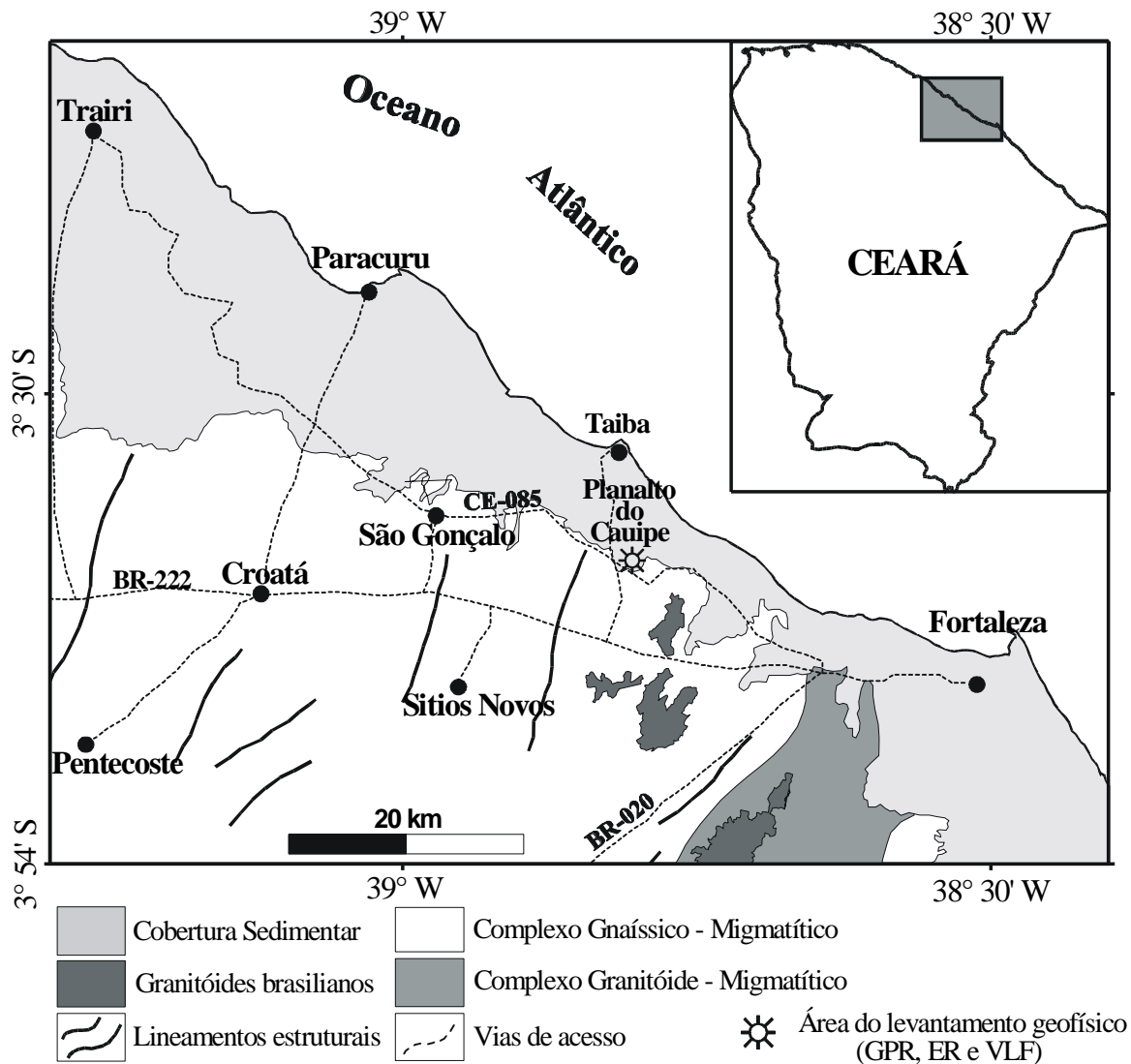


Fig. 1. Localização do levantamento geofísico e mapa geológico simplificado com as principais feições geológicas e vias de acesso da região costeira do Norte do Ceará. Adaptado do Mapa Geológico do Estado do Ceará (Cavalcante et al., 1983).

GEOFÍSICA

SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL - SEV

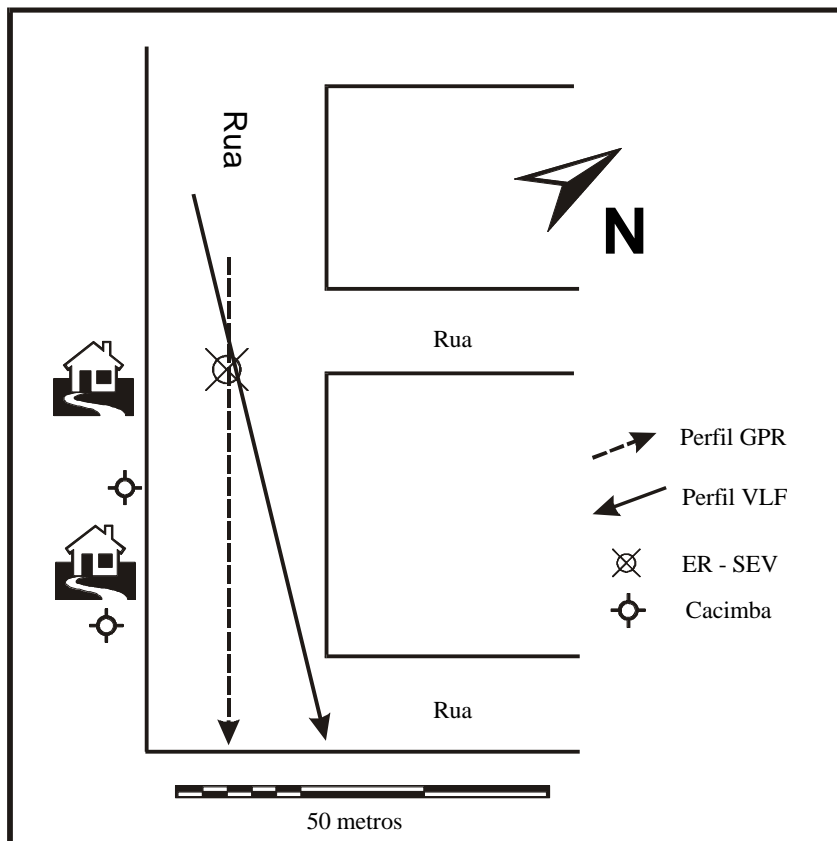
A caracterização interna do sistema aquífero do Planalto do Cauípe está sendo realizada a partir da conjugação de métodos geofísicos de investigação rasa aplicados em áreas-alvo. A escolha de tais áreas teve como base um detalhado levantamento geológico, geofísico e hidrogeológico executado por Castelo Branco (2000) na região costeira entre Fortaleza e Paracuru, no âmbito do Projeto Nordeste. O presente trabalho trata dos resultados preliminares obtidos em uma das áreas selecionadas (Fig. 1).



Fig. 2. Afloramento de rochas gnaíssicas intensamente intemperizadas, subjacente a fina camada de solo arenoso. Margem esquerda da Rodovia Estruturante (CE-085) no sentido Fortaleza - Paracuru. Coordenadas geográficas: 3° 36' 27" S e 38° 56' 58" W.

Na área-alvo escolhida (Fig. 3), pôde-se observar duas cacimbas, que foram escavadas até atingirem o topo do embasamento alterado, a profundidades entre 5 e 7 m, apresentando nível estático em torno de 5 m. Uma das cacimbas encontra-se abandonada e sem revestimento, permitindo a análise direta da cobertura sedimentar formada apenas por solo arenoso de coloração cinza amarelada. Arenitos típicos do Grupo Barreiras não puderam ser observados neste local.

Inicialmente, uma sondagem elétrica vertical (SEV) foi conduzida próxima às cacimbas (Fig. 3), com o intuito de reconhecer o comportamento geoeétrico dos diferentes litotipos de subsuperfície, além de determinar a profundidade de investigação a ser adotada para o método GPR. A SEV foi conduzida com arranjo Schlumberger e afastamento máximo de 300 m entre os eletrodos de corrente. O resistímetro utilizado foi o PER-80 da Firma DPM de Fortaleza (CE). Os dados de resistividade aparente medidos foram invertidos a partir de um modelo de 5 camadas geoeétricas (Fig. 4), com o programa RESEL desenvolvido por Marinho (1997).



(a)



(b)

Fig. 3. Localização da sondagem geolétrica (SEV) e dos perfis geofísicos GPR e VLF: em planta (a) e foto (b).

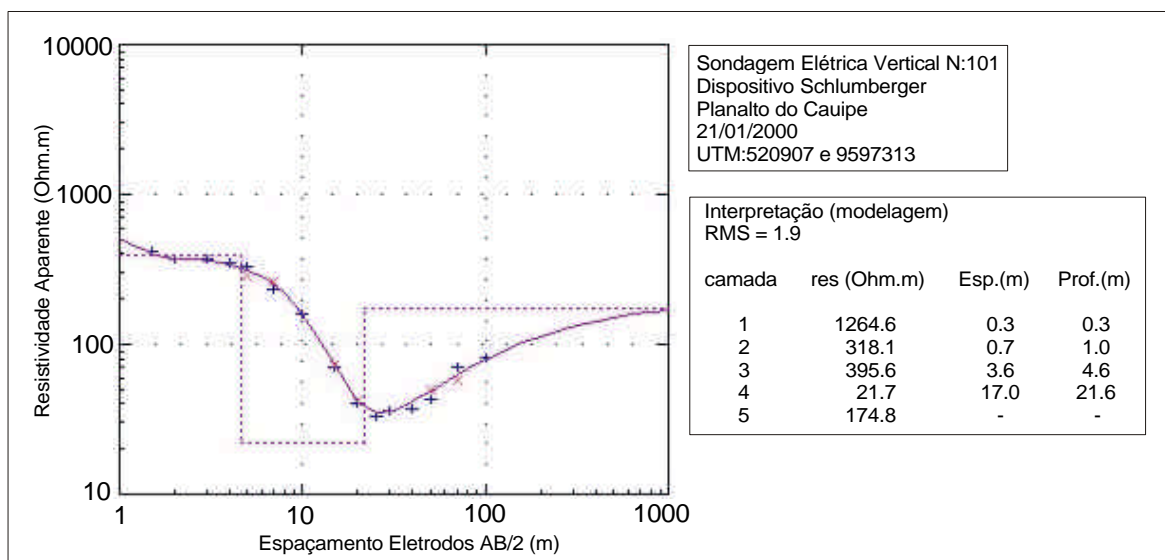


Fig. 4. Sondagem elétrica vertical do Planalto do Cauípe e modelo geofísico de 5 camadas geológicas.

As duas primeiras camadas apresentam espessuras de até 1 m e resistividades variando de 1260 a 320 Ω .m, representando um solo arenoso e seco (Fig. 5). A camada subjacente tem 3,6 m de espessura e resistividade da ordem de 400 Ω .m. Esta camada geológica representa sedimentos areno-argilosos saturados, podendo ser correlacionada com os sedimentos inconsolidados cinza amarelados observados na cacimba. A quarta camada tem uma espessura da ordem de 17 m e baixa resistividade (21,7 Ω .m). Seu topo coincide com a profundidade onde o embasamento alterado foi encontrado nas cacimbas. Uma resistividade da ordem de 20 Ω .m é indicativa de um avançado estágio de intemperismo e saturação de rochas cristalinas. A partir de 21,6 m de profundidade, a resistividade sobe bruscamente para 170 Ω .m, refletindo o embasamento gnáissico não alterado. Na curva da SEV (Fig. 4) pode-se observar uma pequena inflexão entre 30 e 40 m de espaçamento AB/2 entre os eletrodos de corrente, sugerindo a presença de uma zona fraturada entre as camadas 4 e 5, como pode ser observado na coluna geológica da Fig. 5.

VERY LOW FREQUENCY - VLF

Um caminhamento VLF foi conduzido com o objetivo de detectar a referida zona fraturada e prováveis estruturas frágeis na área pesquisada. No método VLF, um campo eletromagnético horizontal é transmitido por estações de rádio militares, que usam uma faixa de frequência de 15 a 30 KHz. Quando corpos condutores são alcançados frontalmente pelo campo magnético, gera-se então um campo secundário. O VLF mede a varia-

ção angular das componentes vertical (quadratura) e horizontal (em fase) do referido campo secundário. A técnica já é bem estabelecida na literatura geofísica, principalmente para a detecção de estruturas condutivas como fraturas abertas em domínios fissurais.

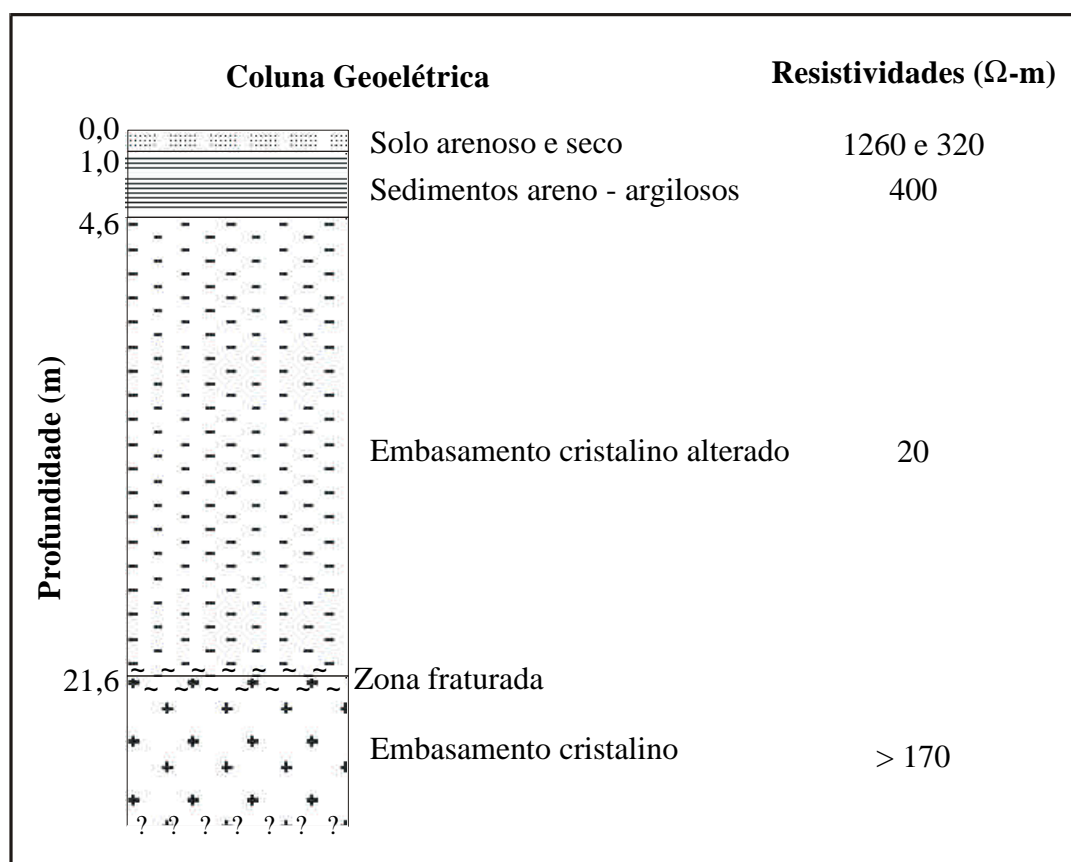


Fig. 5. Coluna Geoelétrica do Planalto do Cauípe obtida a partir da inversão dos dados da SEV.

O equipamento utilizado foi um VLF - WADI da ABEM, sintonizado na frequência de 24 KHz. Aos dados do perfil VLF foi aplicado o filtro de Karous & Hjelt (1983) para gerar uma pseudo-seção vertical de densidade de corrente. A Fig. 6 mostra a distribuição da densidade de corrente até a profundidade de 50 m. A parte real é marcada por uma anomalia positiva entre 40 e 100 m, com dois máximos ocorrendo a 15 m e 30 m de profundidade e com mergulho para SE. Na parte imaginária, uma anomalia de curto comprimento de onda surge próximo a superfície em torno de 45 m de distância. Mais a SE, pode-se observar uma pronunciada anomalia negativa, com caimento para SE e localizada bem próxima a anomalia positiva da parte real. Tais respostas espectrais sugerem a presença de uma zona fraturada em subsuperfície, em concordância com o resultado da SEV.

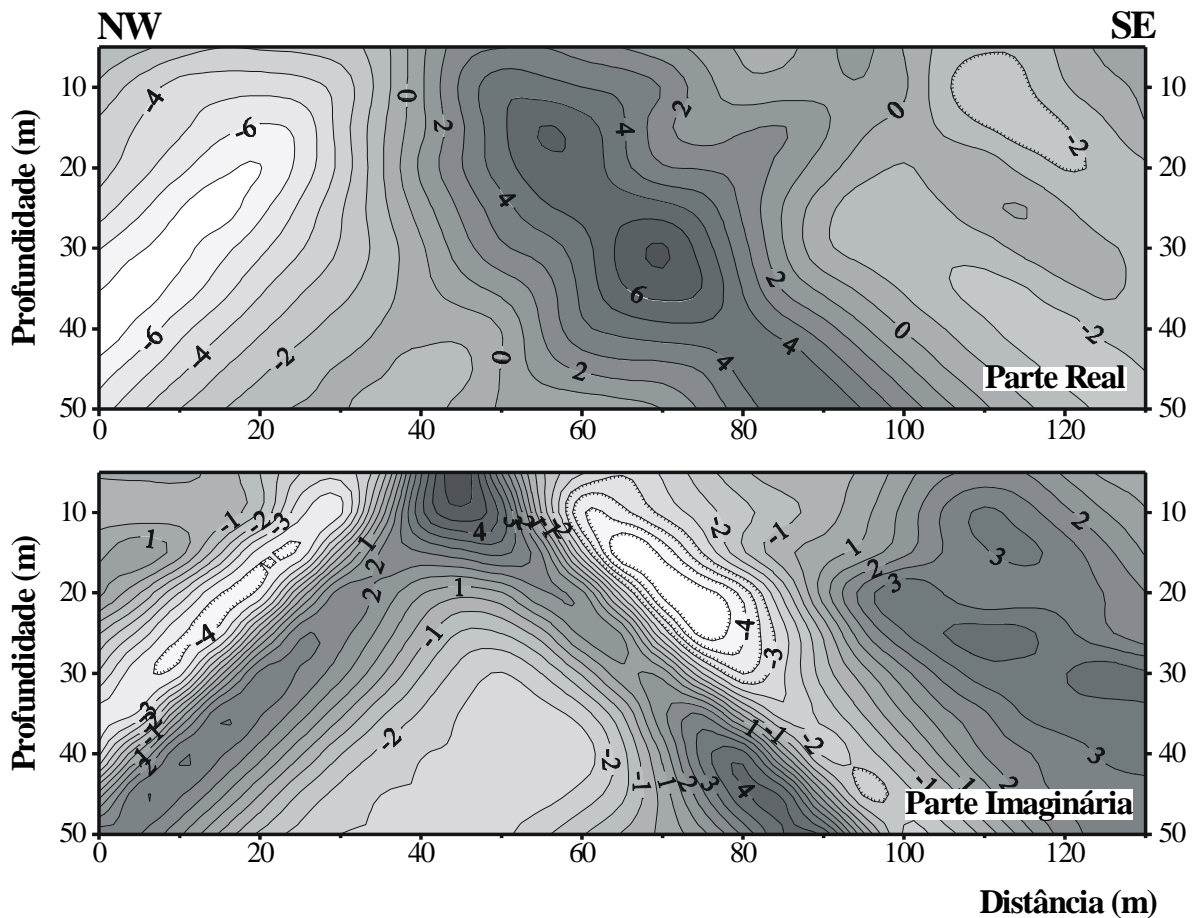


Fig. 6. Pseudo-seção de densidade de corrente (partes real e imaginária) do Sistema Aquífero do Planalto do Cauípe.

GROUND PENETRATING RADAR - GPR

O método GPR é uma técnica geofísica em que um pulso eletromagnético é transmitido na superfície em direção ao subsolo, onde é refletido, refratado e difratado. A parte refletida da energia do pulso é captada na superfície por uma antena receptora (Davis & Annan, 1989). Os parâmetros controladores da profundidade de investigação são as propriedades elétricas do meio (condutividade e permissividade elétrica) e a frequência dos pulsos eletromagnéticos, cujo espectro utilizado varia de 10 a 1000 MHz. Existe uma relação inversa entre resolução e profundidade de investigação, em função da frequência utilizada. Baixas frequências resultam em maiores profundidades de até 50 m, porém com menor resolução. Frequências acima de 400 MHz permitem alta resolução, mas com penetrabilidade de apenas poucos metros.

O levantamento GPR foi conduzido com um equipamento da GSSI modelo SIR System-2, nas frequências de 80 MHz para investigação mais profunda (até 35 m) e 400 MHz para o detalhamento da porção superior do sistema aquífero (até 6 m). Duas técnicas de aquisição foram empregadas: a) Afastamento constante e b) Família de ponto médio comum (CMP). A aquisição com afastamento constante teve como objetivo o imageamento dos refletores em perfis contínuos. Para a antena com frequência de 80 MHz foi utilizado um espaçamento entre as antenas transmissora e receptora de 1,0 m, com leituras efetuadas a cada 0,20 m em uma seção de 70 m de comprimento (Fig. 3). O tempo de registro foi de 500 ns. O perfil GPR de 400 MHz foi realizado com uma antena monoestática (antenas transmissora e receptora são fixadas em um único equipamento), com leituras efetuadas a cada 0,25 m e tempo de registro de 100 ns. O processamento dos dados adquiridos constou da aplicação de filtros atenuadores de frequências e migração no tempo, sendo executado com o *software* RADAN da GSSI.

A aquisição com família de ponto médio comum (CMP) foi conduzida para obter-se estimativas das velocidades médias de propagação da onda eletromagnética no meio rochoso. Neste caso, a antena fonte é fixada em um ponto e a receptora posicionada a uma distância correspondente a um afastamento mínimo de 1,0 m. As antenas foram então deslocadas retilineamente até a posição de afastamento máximo de 40 m, em intervalos regulares de 0,2 m, totalizando 100 traços de radar. O tempo de registro foi de 400 ns. A família CMP dos dados GPR (Fig. 7) mostra duas ondas diretas, uma aérea (ODA) e outra que corre no solo (ODS), além de uma faixa ruidosa entre 120 e 150 ns e vários refletores com um formato hiperbólico característico. As velocidades destas reflexões podem ser calculadas pela seguinte expressão:

$$V_m = \frac{x}{\sqrt{t_x^2 - t_0^2}}, \quad (1)$$

onde V_m é a velocidade média da onda em m/ns, x a distância entre dois traços, t_0 o tempo duplo de viagem da onda na origem e t_x o tempo duplo de viagem na distância x . A onda direta no ar (D1 na Fig. 7) apresentou uma velocidade média de 0,29 m/ns e a onda direta no solo de 0,11 m/ns. Devido a forte interferência das ondas diretas nos primeiros 60 ns não foi possível obter estimativas confiáveis para a velocidade do nível freático. Os sedimentos areno-argilosos (Refletor R1) fornecem velocidades da ordem de 0,09 m/ns, enquanto que o embasamento intemperizado de 0,14 m/ns (Refletores R2 e R3) e o embasamento não alterado 0,28 m/ns (Refletores R4 e R5). A partir das velocidades obtidas

e das informações das cacimbas, determinou-se um valor médio para a constante dielétrica, que é usada para a conversão da escala vertical de tempo para profundidade. Estas velocidades também foram usadas para a migração dos dados GPR da seção com antena de 80 MHz.

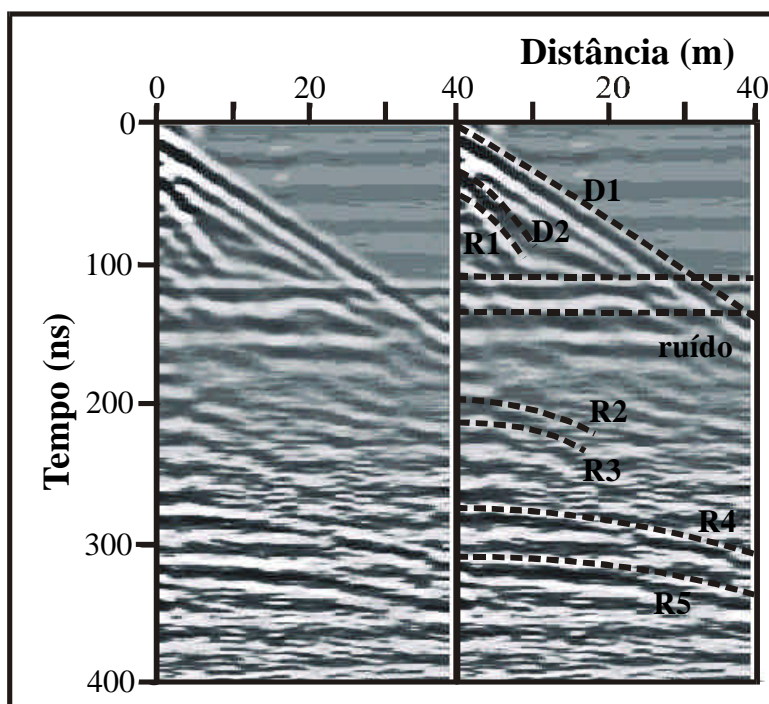


Fig. 7. Família de ponto médio comum (CMP) usada para obter estimativas das velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas. D1: Onda Direta no Ar; D2: Onda Direta no Solo; R1 a R5: Refletores utilizados no cálculo de velocidades.

A Fig. 8 mostra a seção GPR migrada, obtida com a antena de 80 MHz. Três refletores separam 4 seqüências estratigráficas com propriedades geoeletricas distintas. A primeira seqüência tem uma espessura média de 5 m e é correlata com o pacote de sedimentos areno-argilosos observados nas cacimbas e na coluna geoeletrica da SEV (Fig. 5). A seqüência subjacente representa as rochas do embasamento intemperizado, que atingem profundidades de até 23 m. Um forte refletor em torno de 200 ns parece dividir esta seqüência em duas sub-unidades a uma profundidade próxima a 16 m (Fig. 8). Tal subdivisão não pode ser detectada na SEV, provavelmente pela menor resolução deste método. Dois refletores em 310 e 365 ns marcam uma seqüência fortemente estratificada entre as profundidades de 23 a 27 m, que pode representar a zona fraturada identificada na SEV e no perfil VLF (Fig. 6). Por fim, o topo do embasamento não alterado é marcado pelo forte refletor a 27 m de profundidade.

A seção GPR obtida com 400 MHz (Fig. 9) oferece um imageamento de alta resolução dos primeiros 6 m do subsolo. A seqüência sedimentar subjacente ao embasamento intemperizado pode ser individualizada em 4 pacotes distintos, de acordo com suas respostas aos pulsos eletromagnéticos. Um refletor pode ser observado a 1,2 m de profundidade. Ele indica o nível freático da área, separando o solo arenoso e seco dos sedimentos saturados subjacentes, concordantemente com a coluna geométrica da Fig. 5. Os demais refletores mostram detalhes do acamamento predominantemente horizontal dos sedimentos inconsolidados. A base desta seqüência de sedimentos areno-argilosos está bem marcada por um forte refletor a 4,3 m de profundidade, novamente em concordância com os resultados da SEV.

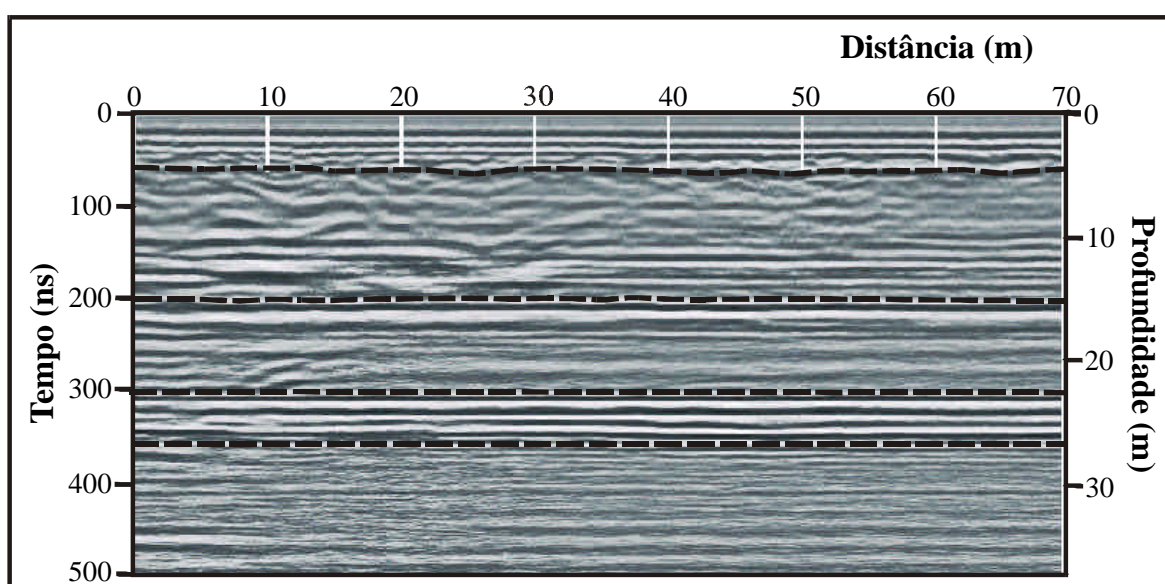


Fig. 8. Seção GPR migrada do sistema aquífero do Planalto do Cauípe - CE. Freqüência centrada em 80 MHz, com afastamento comum de 1,0 m.

CONCLUSÕES

A integração de vários métodos geofísicos de investigação permitiu a caracterização interna do sistema aquífero do Planalto do Cauípe na região litorânea do Ceará. Nesta região, o aquífero encontra-se no domínio sedimentar e é constituído por uma fina cobertura sedimentar sobre um embasamento precambriano intensamente intemperizado. Os métodos elétricos e eletromagnéticos ER, GPR e VLF possibilitaram, em conjunto com informações de ordem geológica e hidrogeológica, o mapeamento dos contatos sub-superficiais destas unidades geológicas.

Em uma das áreas-alvo selecionadas, a avaliação geofísica mostra um pacote sedimentar de aproximadamente 4,5 m de espessura, com um nível freático irregular a 1,2 m, separando o solo arenoso e seco dos sedimentos areno-argilosos saturados. O embasamento cristalino apresenta uma faixa de material intensamente intemperizado de 17 m, com comportamento geoeletrico semelhante ao de rochas sedimentares bastante saturadas. Na base desta faixa alterada, uma estreita zona fraturada não aflorante pôde ser detectada pelos métodos geofísicos. Apesar do caráter preliminar dos resultados apresentados, fica claro que a geometria interna de todo o sistema aquífero deverá ser reconstituída com uma excelente precisão.

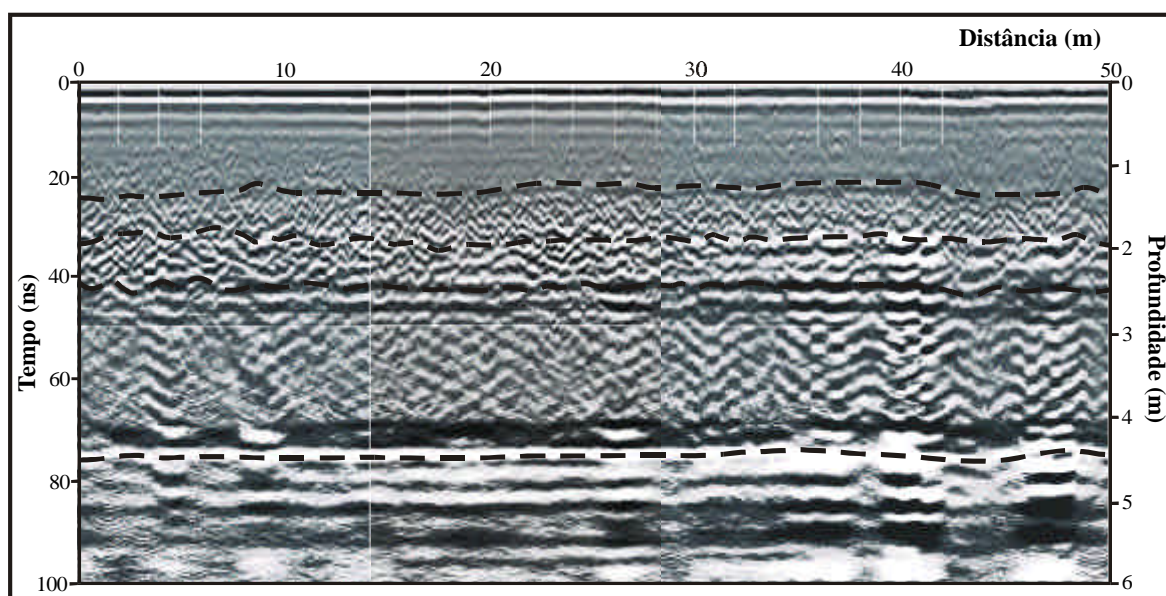


Fig. 9. Seção de GPR filtrada do sistema aquífero do Planalto do Cauípe. Frequência centrada em 400 MHz, com afastamento comum de 0,2 m.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PADCT III - GMT, CNPq e à Fundação Banco do Brasil pelo suporte financeiro destinado à aquisição do sistema GPR, VLF e ER, respectivamente. O desenvolvimento de trabalho teve suporte financeiro da CAPES e CNPq, mediante bolsas de Professor Visitante, DCR e PIBIC. Somos gratos aos bolsistas do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo auxílio nos trabalhos de campo.

REFERÊNCIAS

- Brandão, R.L., 1995, Projeto SINFOR: Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza. Texto Explicativo. Série Cartas Temáticas, 1, 34 p.
- Brito Neves, B.B., 1975, Regionalização Geotectônica do Pré-Cambriano Nordestino. Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Castelo Branco, R.M.G., 2000, Reconhecimento Geofísico e Hidrogeológico da Região Costeira entre Fortaleza e Paracuru, Norte do Ceará. Projeto Nordeste. Relatório Final, inédito, 200 p.
- Cavalcante, J.C., Ferreira, C.A. & Medeiros, M.F., 1983, Mapa Geológico do Estado do Ceará 1:500.000. DNPM/CPRM, Brasília.
- Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989, Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- Karous, M. & Hjelt, S.E., 1983, Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical Prospecting*, 31: 782-794.
- Marinho, J.M.L., 1997, Inversões de sondagens de eletrorresistividade com aplicação ao estudo de aquíferos clásticos na região Acaraú - Itarema, Ceará. Tese de Doutorado, UFBA, Salvador, 173 p.