

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS GEOFÍSICAS ELETROMAGNÉTICAS (EM-34 E VLF) NA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS FAVORÁVEIS À CAPTAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: OS DADOS PROVENIENTES DE IRAUÇUBA – FUMO, CRISTALINO DO NW DO CEARÁ, BRASIL.

Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco¹
Luciano Soares da Cunha¹

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo geofísico integrando os métodos EM e VLF com geologia de campo aplicados na região de Fumo em Irauçuba no Estado do Ceará. Esta área é caracterizada por escassez em recursos hídricos. Foi identificado um poço produtor anômalo para a área que apresenta 8m³/h, maior que a produção comum para o aquífero cristalino que é ao redor 1,7m³/h. Os resultados mostraram uma perfeita aplicabilidade das técnicas eletromagnéticas adotadas que evidenciaram anomalias importantes associadas àquele poço produtor.

INTRODUÇÃO

A localidade de Fumo está situada no município de Irauçuba, cerca de 160 km para oeste da cidade de Fortaleza, podendo o acesso ser feito através da BR.222. Esta região é caracterizada por ser uma das mais secas do Estado do Ceará. Por se tratar de uma região geologicamente problemática em termos de recursos hídricos subterrâneos e, pelo fato de apresentar um poço tubular profundo com vazão destoante dos demais daquela região, resolveu-se investigar detalhadamente com a aplicação de métodos geofísicos eletromagnéticos, especificamente utilizando os equipamentos EM-34 e WADI-VLF. Investigações geológicas e estruturais de detalhe também foram levadas a efeito como forma de dar suporte aos caminhamentos geofísicos. A figura 1 abaixo mostra a localização da área do Fumo, no município de Irauçuba, onde foram desenvolvidos os trabalhos de geofísica e de geologia.

¹ Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto – LGPSR – Departamento de Geologia – DEGEO. Universidade Federal do Ceará – UFC. Campus Universitário do PICI, Bloco 913 – 60.455-760 – Fortaleza – Ceará. mariano@ufc.br_x7hmp@ufc.br

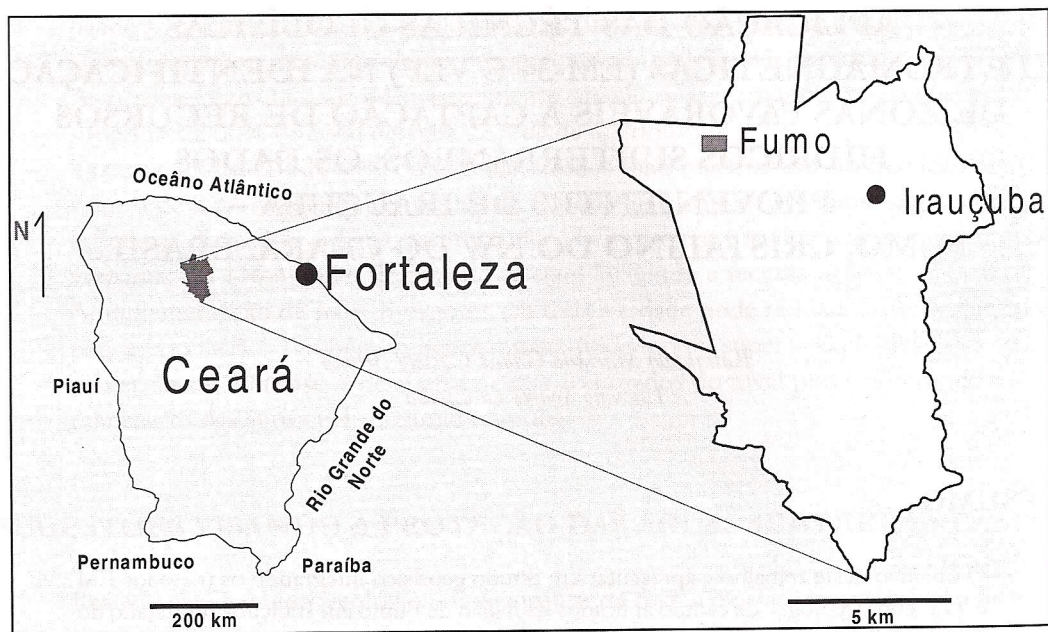


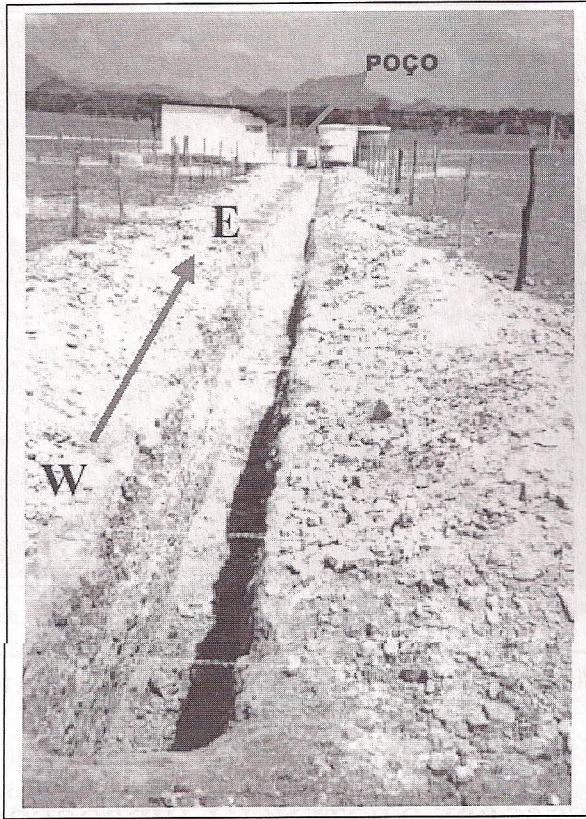
Figura 1: Localização da área do Fumo no município de Irauçuba onde foram desenvolvidos os trabalhos de geologia e geofísica.

CONSIDERAÇÕES GEOLÓGICAS BÁSICAS

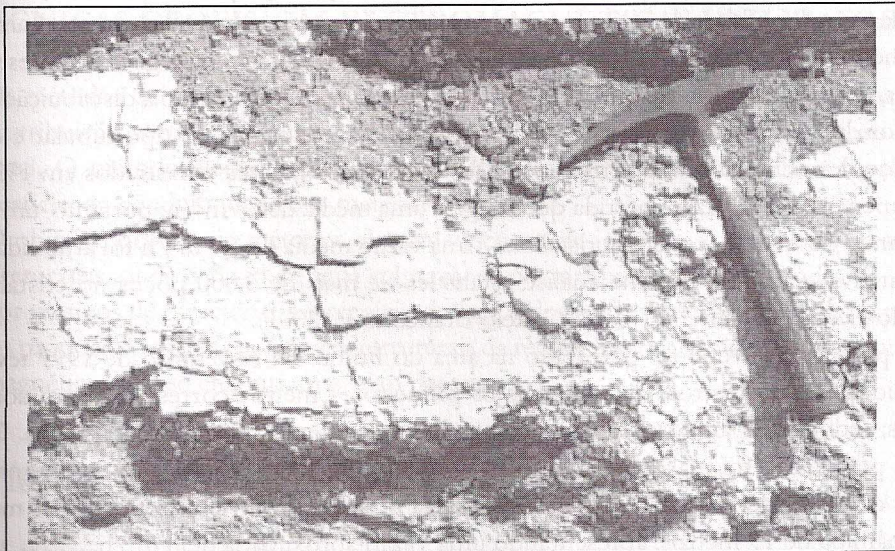
Observa-se o predomínio de rochas do embasamento cristalino de idade pré-cambriana, constituídas fundamentalmente por granitos, gnaisses e migmatitos. Sobre esse substrato repousam coberturas aluvionares, de idade recente.

Morfologicamente a área do Fumo é plana com lajedos de até 1,5 m de altura e com cobertura coluvionar. Raros afloramentos ultrapassam 10 m². Litologicamente, foram observados ortoderivadas, migmatitos, granitos de granulação grossa, granitos róseos e branco, deformado, de granulação média a fina, sem biotita. Estruturalmente, observa-se foliação milonítica/bandamento metamórfico: WNW-ESE (Az 280/50 E). Os afloramentos alinham-se segundo a estruturação local aproximadamente WNW-ESE. Os corpos ígneos intrusivos (granito-gnáissico e diabásio) estruturam-se também na direção Az 300. As principais direções de fraturas medidas em afloramentos estão, no geral, orientadas para NE e para NW (Az.40, Az. 300) apresentando mergulhos sub-verticalizados.

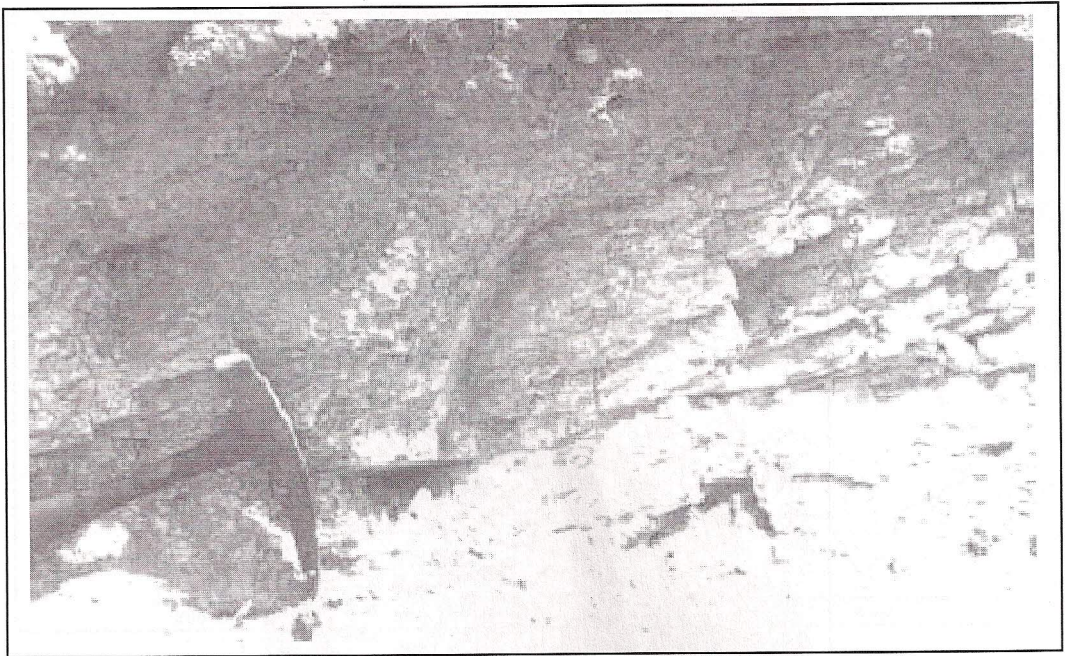
Observações em fotografias aéreas, escala 1: 25.000, da região mostram escassos lineamentos até 500 m em torno do poço. Lineamentos NNE com 100 m de comprimento e N60W com 280 m de comprimento, além de lineamento N25W com 250 m de extensão. Num raio de 500 m do poço, apenas 5 lineamentos foram reconhecidos. Importante feixe de lineamentos N50-60E, conjugados com feixes menores E-W, ocorre a 250 m a SE da posição do poço, seguindo a estruturação regional. O feixe NE estende-se por 2000 m, possuindo lineamentos com 200 m a 350 m de comprimento (Castelo Branco *et al.* 2001).



Fotografia 1: Aspecto da trincheira aberta (executada pela CPRM) na área do Fumo em Irauçuba com direção E-W, portanto paralela à direção de um dos perfis EM e VLF. Ao fundo observa-se o poço profundo.



Fotografia 2: Fotografia tomada no interior da trincheira mostrando padrão de fraturamento em duas direções principais NS e EW.



Fotografia 3: Ainda no interior da trincheira mostrando a foliação predominantemente EW.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO

As rochas cristalinas predominam na área e representam o que é denominado de “aquífero fissural”, assim os reservatórios são aleatórios, descontínuos e de pequena extensão. Dentro deste contexto, as vazões produzidas pelos poços são em geral pequenas e, em função da falta de circulação e dos efeitos do clima semi-árido a água é, na maior parte das vezes, salinizada. O levantamento realizado pela CPRM em 1999 no município de Irauçuba registrou a presença de 73 poços, dos quais 65 do tipo tubular e 8 do tipo amazonas. Com relação à distribuição desses poços por domínios hidrogeológicos, foi verificado que todos são do tipo tubular e encontram-se no domínio das rochas cristalinas. Dos 65 poços tubulares cadastrados em 1998 pela CPRM apenas 28 têm vazão inferida que chega a uma média de $2,7\text{m}^3/\text{h}$, portanto, um pouco acima para o domínio das rochas cristalinas. Uma vazão média de $1,7\text{m}^3/\text{h}$ foi atribuída como representativa, resultado de uma análise estatística de mais de 3.000 poços no cristalino do estado do Ceará (Möbus *et al.*, 1998, Castelo Branco *et al.*, 2001).

O poço tubular que foi perfurado na área do Fumo em novembro de 1997 teve uma profundidade de 60 metros, onde apenas os primeiros 4 metros corresponderam aos solos residuais; sedimentos argilosos diversos e produtos de alteração da rocha cristalina. Todo o resto da perfuração foi realizado atravessando rochas cristalinas compactas como gnaisses e granitos deformados. O poço apresentou naquela ocasião um nível estático de 7,4 metros e nível dinâmico de 19 metros, apresentando uma vazão aproximada de $8\text{m}^3/\text{h}$.



Fotografia 4: Um dos raros afloramentos superficiais mostrando fraturas abertas direcionadas segundo NW.

Essas rápidas informações apresentadas e disponíveis sobre o quadro hidrogeológico desta área foi o motivo maior de se conceber a execução de prospecção geofísica utilizando-se dois métodos eletromagnéticos de modo simultâneo, o eletromagnético indutivo EM-34-3-XL e o método eletromagnético de baixa frequência VLF com o objetivo de tentar qualificar em termos de resposta geofísica a ocorrência do poço “anômalo” da área em questão.

AS TÉCNICAS GEOFÍSICAS ELETROMAGNÉTICAS UTILIZADAS

Os métodos de prospecção por campos variáveis podem ser utilizados tanto para estudar a distribuição vertical das propriedades das rochas como para investigações no sentido horizontal. O método eletromagnético é influenciado principalmente pelas variações, em subsuperfície, da condutividade dos materiais terrestres.

O objetivo do uso de métodos eletromagnéticos de indução é verificar a presença de zonas fraturadas, onde o fluxo de água subterrânea normalmente é intensificado.

Por motivos de características técnicas da área e dos objetivos específicos desta pesquisa além das próprias condições geológicas estruturais da região, foram adotadas duas metodologias eletromagnéticas que se encontram abaixo descritas.

ELETROMAGNÉTICO VLF – VERY LOW FREQUENCY

A técnica do VLF, aquela aqui adotada, assim como as demais técnicas utilizadas dentre os métodos eletromagnéticos de prospecção geofísica, está baseada no fenômeno da indução eletromagnética. Assim, para o caso de rochas cristalinas do embasamento antigo, a emissão de ondas eletromagnéticas de baixa frequência (15 a 30 KHz) através de uma fonte com po-

tência entre 300 e 1000 Kwatts, proporciona a geração de um campo eletromagnético primário com ondas horizontais. As fontes utilizadas estão localizadas a longa distância e em diversas partes do globo terrestre (EUA, URSS, França, etc). Se por ventura estas linhas de campo atingirem frontalmente uma estrutura geológica condutora (**que poderá conter ou não água**) será gerado um campo eletromagnético secundário, com ondas verticais. Desta forma, um caminhamento VLF, bem posicionado, detectará este campo secundário cuja resposta será sob a forma de uma anomalia expressa como densidade de corrente. A estruturação geológica do Pré-cambriano nordestino é propícia à aplicação desta metodologia.

Assim, a metodologia VLF, aplicada com critério e, sobretudo, levando-se em consideração uma série de outros parâmetros (geologia, estrutural, hidrogeologia, etc), torna-se uma importante ferramenta para a pesquisa geofísica de água subterrânea.

O equipamento utilizado nesta pesquisa é fabricado pela ABEM da Suécia, modelo WADI, opera com freqüências de 15 a 30 kHz; possui um rastreador de sinais que realiza a busca automática das antenas (fontes) transmissoras de maior intensidade na direção em que o levantamento esta sendo efetuado no campo (Fotografia 5).

A visualização dos dados é realizada através de um *display* de cristal líquido onde os dados se apresentam pré-processados, através da aplicação de filtros matemáticos. Posteriormente às observações e interpretações efetuadas ao longo do levantamento, os dados são ainda descarregados (transferidos) para um microcomputador (*notebook*) onde são visualizados através de uma série de recursos de infomática (*softwares*) como por exemplo as pseudo-seções verticais que permitem uma excelente avaliação das anomalias presentes em uma dada região. Estes últimos são os dados aqui apresentados quer sob a forma de dado filtrado a uma determinada profundidade de investigação (por exemplo: 10 metros), quer sob a forma de pseudo-seções verticais onde se pode observar as anomalias até profundidades da ordem de 40 a 50 metros, dependendo das situações geológicas.

ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO - EM

O método eletromagnético indutivo é baseado na variação das componentes e inclinação do vetor campo eletromagnético resultante, gerado por uma bobina transmissora e medido por uma bobina receptora.

Uma corrente elétrica alternada circulando por uma bobina transmissora (Tx), cria ao seu redor um campo eletromagnético indutivo alternado (campo magnético primário, Hp), que induz correntes elétricas secundárias no solo, sob o equipamento. Estas correntes secundárias (Ts) por sua vez, geram um campo eletromagnético alternado (campo magnético secundário, Hs) que é proporcional à corrente induzida. Uma parte deste campo secundário induz corrente em uma bobina receptora (Rx), que é ligada à transmissora por meio de um cabo de referência, e produz uma saída que é proporcional à condutividade do solo.

De maneira geral, admite-se que a relação entre os módulos dos dois campos seja dada por $H_s = K H_p$, onde K depende da frequência do campo, da permeabilidade magnética no vácuo, do espaçamento entre as bobinas e da condutividade do meio.

Os valores medidos representam os efeitos combinados das diferentes camadas, suas espessuras e condutividade, desde a superfície até a profundidade de alcance do equipamento.

A rapidez do método permite o aumento da densidade de medidas, possibilitando a delimitação mais precisa das camadas geoeletricas e possíveis zonas fraturadas. Como o equipa-

mento permite investigar diferentes profundidades, pode-se gerar mapas da variação lateral de condutividade elétrica para os diferentes níveis alcançados.

A profundidade de investigação, pode ser considerada, sem um erro apreciável, como dependente do espaçamento e da orientação das bobinas (Figura 2). No modo dipolo horizontal (DH), isto é, com o eixo da bobina na vertical, a profundidade de investigação é de cerca de 0,75 vezes o espaçamento das bobinas (Figura 10). No modo dipolo vertical (DV), isto é, com o eixo da bobina na horizontal, a profundidade de investigação é de cerca de 1,5 vez o espaçamento das bobinas. O EM34-3XL, equipamento utilizado nesta pesquisa, permite três espaçamentos interbobinas, 10, 20 e 40 m, respectivamente. Assim, em condições ideais, é possível investigar profundidades de aproximadamente 7,5, 15 e 30 m no modo DH e 15, 30 e 60 m no modo DV (Figura 2).

O modo dipolo vertical atinge 2 vezes a profundidade de investigação do modo DH e é mais sensível às variações laterais de condutividade. No entanto, é altamente susceptível ao desalinhamento das bobinas. No modo dipolo horizontal, materiais acima da profundidade efetiva alcançada pelo instrumento contribuem em cerca de 70% da resposta.

O método permite realizar sondagem e perfilagem eletromagnética, com procedimentos semelhantes ao método elétrico de corrente contínua. Os dados são apresentados em mapa, traçando-se curvas de isocondutividade para as quatro profundidades de investigação e em perfis e/ou pseudo-seções verticais.

Espaçamento interbobinas	Frequência	Profundidade modo DH	profundidade modo DV
10 metros	6400 Hz	7.5	15
20 metros	1600 Hz	15	30
40 metros	400 Hz	30	60

Figura 2 - Profundidades de penetração do EM34-3XL para diferentes espaçamentos interbobinas e frequência.

O equipamento utilizado permite obter a condutividade elétrica aparente do solo diretamente em mSiemens/metro. A função que indica a leitura direta no instrumento requer que o número de indução B satisfaça a condição:

$$B = \omega \mu_0 \sigma_a L / 2 \leq 1$$

onde:

σ_a = condutividade aparente do solo (S/m)

$$\omega = 2 \pi f$$

f = frequência (s^{-1})

μ_0 = permeabilidade do vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

L = espaçamento entre as bobinas

Isto é conhecido como operação a “baixo número de indução” que garante uma *skin depth* (profundidade de investigação) sempre significativamente maior para cada espaçamento interbobinas, caso a frequência de operação seja baixa. Sob estas circunstâncias, a resposta do solo é a fase da componente quadratura do sinal recebido. Nos casos em que os valores de condutividade são moderados a baixos, a resposta é linearmente proporcional à condutividade

do terreno, tal que a unidade de leitura do instrumento seja miliSiemens/m, mas para altas condutividades (da ordem de centenas de mS/m) a resposta não é linear.

Para estas condições, a condutividade é diretamente proporcional à razão do campo magnético secundário pelo primário:

$$\sigma_a = 4 (H_s) / \omega \mu_0 I^2 (H_p)$$

onde: **H_s** = campo magnético secundário
H_p = campo magnético primário

A literatura específica mostra que a relação entre condutividade real e condutividade indicada não é linear em ambiente de alta condutividade. Quando os valores são superiores a 700 mS/m a condutividade indicada com dipolo vertical tende a zero. Em terrenos onde a condutividade é muito baixa, a resposta do instrumento é também zero. Existem descrições de que a aproximação linear entre os valores reais e indicado pelo equipamento é cada vez pior para valores de condutividade situados entre 100 e 200 mS/m (ou abaixo de 5 a 10 Ohm.m) para dipolo horizontal, e acima de 60 a 70 mS/m (ou abaixo de 15 Ohm.m) para dipolo vertical.

Neste trabalho, utilizou-se os cabo de 40m, obtendo-se leituras a 60 metros de profundidade no modo DV.

Na fotografia 5 são mostrados procedimentos adotados com estas duas técnicas na área do Fumo em Irauçuba, bem como os equipamentos.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

A figura 03 apresenta dois dos perfis realizados com o VLF-WADI que cruzaram o poço produtor. O primeiro foi realizado segundo a direção Az. 45 cruzando a foliação regional e fraturas NW presentes em afloramentos. Este caminhamento utilizou-se da estação transmissora com frequência de 24 kHz e mostra uma anomalia de densidade de corrente centrada na posição 250. Como se observa, a posição do poço produtor está um pouco deslocada em relação a esta anomalia e posicionado em 225; de qualquer forma o poço em questão estaria posicionado ainda em uma zona anômala. Duas outras zonas anômalas podem ainda ser observadas neste caminhamento, nas posições 100 e 150, sendo a mais importante em termos de densidade de corrente aquela da posição 150.

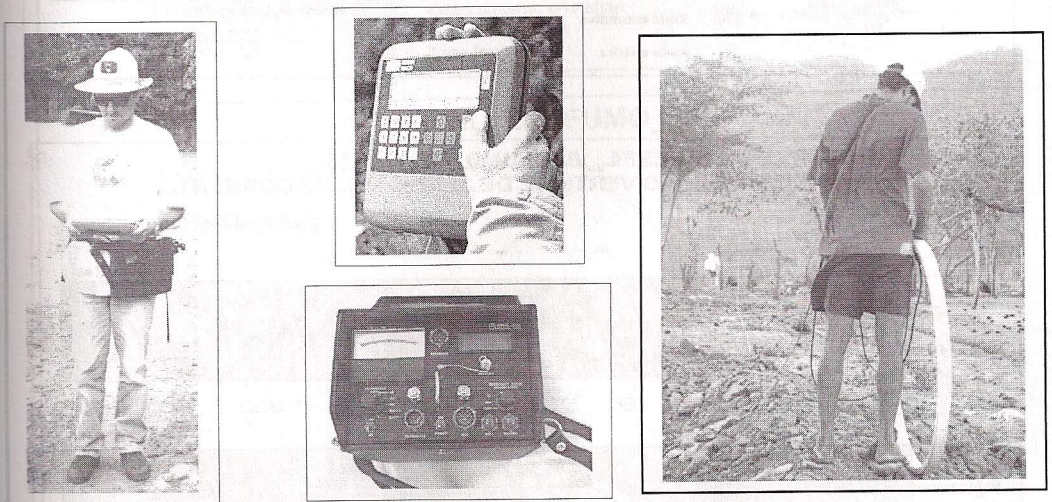
Um outro caminhamento foi realizado na direção Az. 295 sintonizando a estação transmissora com frequência de 18,3 kHz, portanto, ao longo da foliação regional e eventualmente cruzando estruturas de direção perpendicular. Nesta figura se observa agora uma anomalia bem mais expressiva centrada na posição 300, em termos de densidade de corrente; o poço produtor, desta vez, está posicionado em 314. Aqui também se pode notar a presença de outras zonas anômalas menos importantes como nas estações 100 e 425.

Na Figura 04, são apresentados os perfis de condutividade obtidos com o EM34-3XL para os dipolos horizontal e vertical (DH 20, DH 40, DV20 e DV40). O primeiro perfil foi executado na direção Az 45 (perpendicular à foliação) e cruza o poço produtor na estação 360. Uma extensa zona anômala condutiva foi detectada por ambos os dipolos. Entre as estações 340 e 500, o dipolo horizontal (DH20 e DH40) indica uma cobertura mais espessa dentro da zona anômala. Já o dipolo vertical (DV20 e DV40), mais sensível às variações laterais, delinearão a zona de baixa resistividade de forma mais precisa, reduzindo a sua extensão quando comparada com a resposta encontrada

com o dipolo horizontal. Através do DV20 a zona anômala passa a ser localizada entre as estações 380 e 540 mas, com o aumento da profundidade de investigação (DV40), ela fica concentrada entre as estações 380 e 460.

O segundo perfil foi executado na direção Az 295, paralelo à foliação e cruza o poço produtor na estação 420. Comparando-se os perfis é possível notar um aumento no "background", caracterizando quase todo o segundo perfil como uma extensa zona anômala condutiva, quando se observa o DH20, DH40 e DV20. A partir da análise do DV40, é possível individualizar zonas mais anômalas do que outras, como acontece entre as estações 40 a 100, 200 a 250 e 340 a 370.

A julgar pelas informações e resultados aqui apresentados observa-se que as duas técnicas eletromagnéticas adotadas serviram para a caracterização da zona anômala onde está localizado o poço produtor da área do Fumo. Os dados também evidenciam que ao longo das duas direções encontram-se presentes outras zonas anômalas, como que uma alternância sistemática e, ainda, a possibilidade de cruzamento de estruturas próximo ao posicionamento do poço produtor.



Fotografia 5: Conjunto de fotografias mostrando a aplicação do VLF (à esquerda) e do EM-34 (à direita). No meio e acima o equipamento VLF-WADI da ABEM e abaixo o receptor EM da GEONICS.

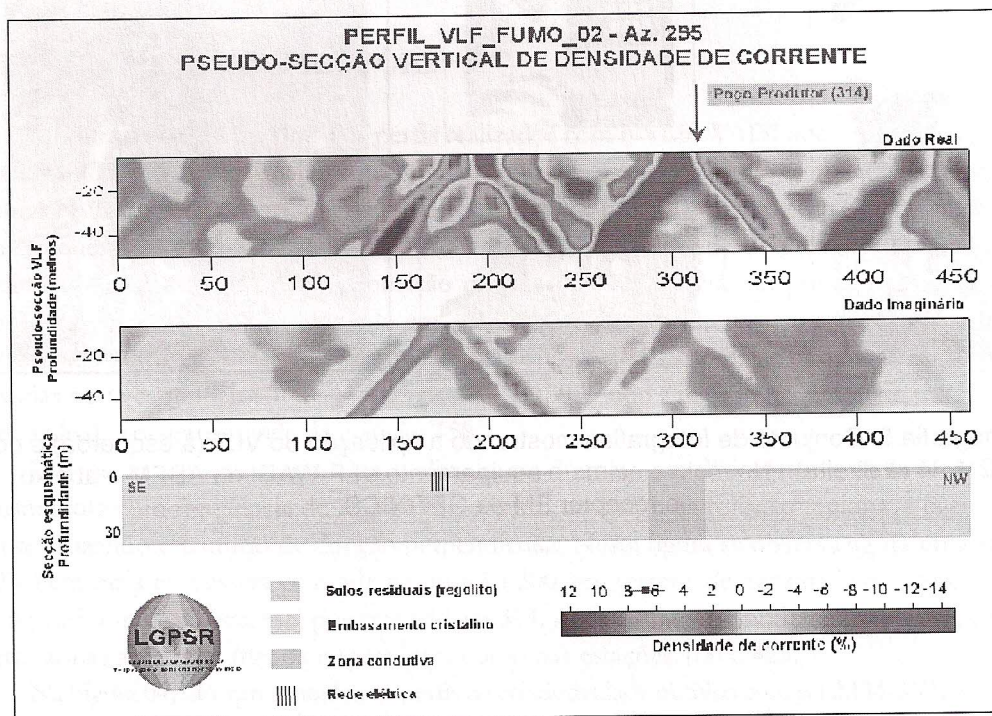
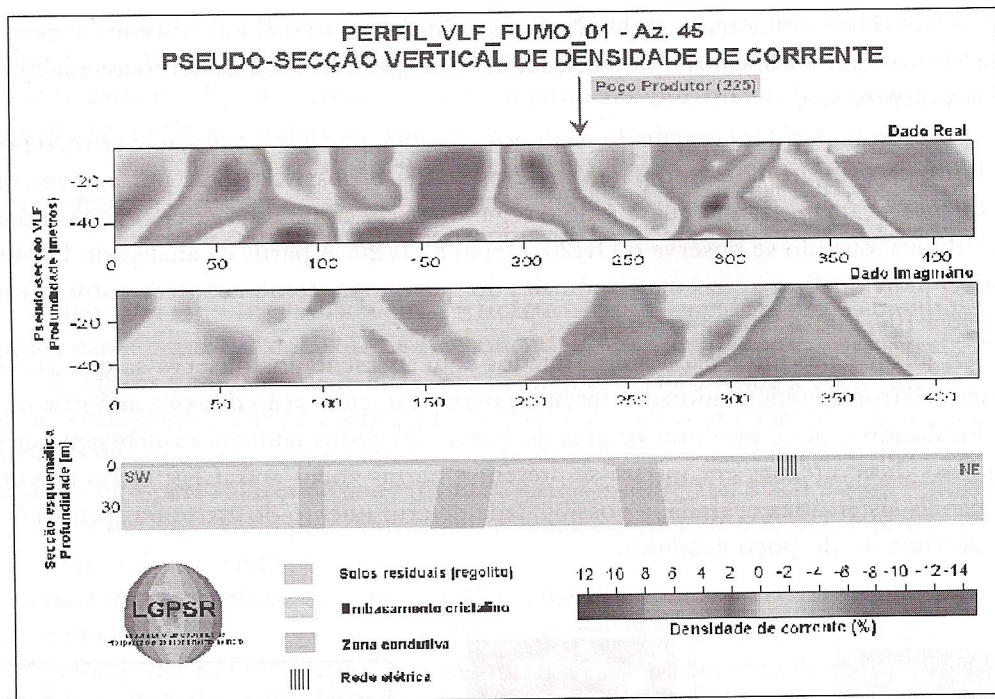


Figura 3: Anomalias VLF detectadas ao longo dos dois perfis realizados na área do Fumo, cruzando o poço profundo em duas direções, Az. 45 e Az. 295, respectivamente. As figuras ilustram os dados real e imaginário sob a forma de pseudo-seções de densidade de corrente. Apresentam, igualmente, croquis esquemáticos de interpretação qualitativa.

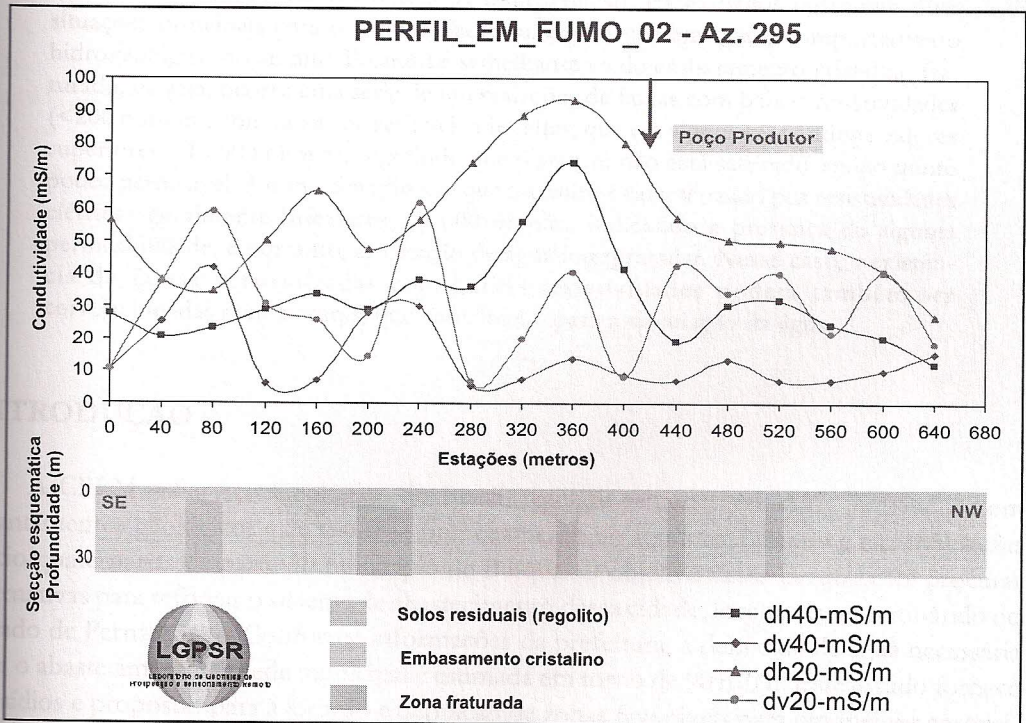
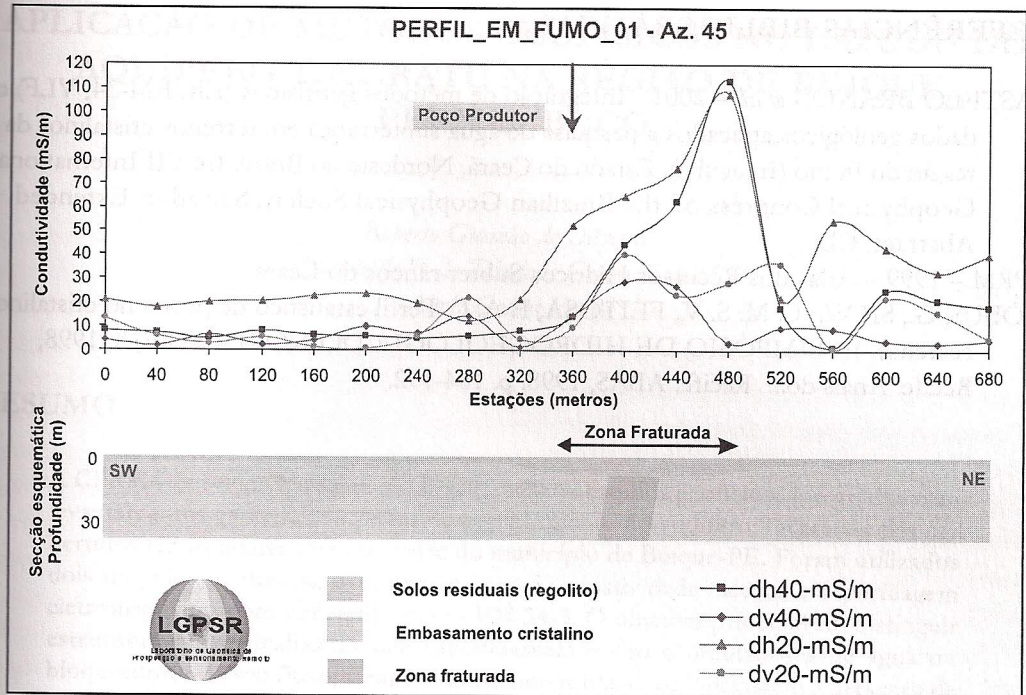


Figura 4 : Zonas anômalas condutivas detectadas ao longo dos dois perfis realizados na área do Fumo, cruzando o poço profundo em duas direções, Az. 295 e Az. 45, respectivamente. As figuras ilustram os dados obtidos com os dipolos horizontal e vertical (DH 20, DH 40, DV20 e DV40) sob a forma de perfis de condutividade aparente (mS/m). Apresentam, igualmente, croquis esquemáticos de interpretação qualitativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTELO BRANCO *et al.* – 2001 - Integração de métodos geofísicos (ER, EM-34, VLF) e dados geológicos aplicados à pesquisa de água subterrânea em terrenos cristalinos da região do Fumo (Irauçuba), Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. In: VII International Geophysical Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador. Extended Abstract, CD.
- CPRM – 1999 – Atlas dos Recursos Hídricos Subter-râneos do Ceará.
- MÖBUS, G., SILVA, C. M. S. V., FEITOSA, F. A. C. Perfil estatístico de poços no cristalino cearense. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO NORD-ESTE, 3, 1998, Recife. Anais do... Recife: ABAS, 1998. p. 184-192.