

MONITORAMENTO GEO-ELÉTRICO DA CONTAMINAÇÃO AQUÍFERA NO PÓLO PETROQUÍMICO DE CAMAÇARI, BAHIA

Olivar A. L. de Lima & Milton J. Porsani

Sondagens elétricas, seções transversais de resistividade e perfilagens elétricas de poços estão sendo empregadas, conjuntamente, visando detectar a possível contaminação aquífera causada pelas indústrias petroquímicas na área de Camaçari, bacia do Recôncavo, Bahia - Brasil. O centro industrial de Camaçari foi implantado sobre o aquífero multi-acamado da Formação São Sebastião, o mais importante reservatório de água subterrânea do estado. Essa atividade industrial já é responsável pela geração de vários corpos de águas superficiais poluídas, e algumas ações reguladoras são necessárias para evitar ou reduzir a contaminação deste sistema aquífero. Dois estudos de caso são detalhados neste trabalho: o primeiro envolve uma bateria de bacias de disposição da lama residual, onde um levantamento geo-elétrico foi realizado no sentido de reconhecer a geologia do sítio, em sub-superfície, e para fornecer um padrão referencial físico antes do enchimento das bacias com a lama; o segundo, inclui a área de uma fábrica de polietileno, onde inferimos a presença de migração vertical de resíduos líquidos para o aquífero subjacente. Nessas duas áreas, foram estudadas 21 sondagens elétricas verticais, sete seções transversais de resistividade obtidas com seis diferentes separações de eletrodos de 5 até 50 m e dois conjuntos de perfilagens elétricas de poços. Os dados de superfície foram interpretados usando mapas e seções de resistividade aparente e através da inversão automática de sondagens Schlumberger completas e parciais. Os perfis de poços foram utilizados com propósitos estratigráficos e para computar fatores de formação e resistividade das águas nos arenitos atravessados nos furos. A partir desses resultados, foi possível delinear a estrutura subterrânea do aquífero até 50 m de profundidade, estimar algumas de suas características petrofísicas e inferir sobre os tipos e formas de contaminação que ocorrem nas duas áreas.

Palavras-chave: Resistividade elétrica; Água subterrânea; Poluição; Petrofísica.

GEOELECTRICAL MONITORING OF AQUIFER CONTAMINATION IN THE PETROCHEMICAL AREA OF CAMAÇARI, BAHIA *Resistivity soundings, transverse profilings and borehole logging are employed in order to detect aquifer contamination caused by raw chemicals and waste products of the petrochemical industries in the Camaçari area, Reconcavo basin, Bahia - Brazil. This industrial center was implanted over the multi-layered São Sebastião aquifer, the most important fresh groundwater reservoir of the state. Such industrial activity is responsible for various surficial polluted water-bodies and requires some preventive controls to avoid or to reduce the underground contamination of this important aquifer system. Two case studies are detailed in this work: one involving a special plant for disposal of the industrial mud effluents, where a geoelectrical survey was done to recognize its sub-surface geology and to characterize an initial reference frame, before filling the basins with mud; the second includes the area around a polyethylene and other polymeric factories, where we infer some depth migration of liquid waste to the underground reservoir. In both areas, 21 vertical electrical soundings, seven transverse resistivity profilings at six different spacings from 5 to 50 m and two sets of electric well logs were studied. The surface resistivity data were interpreted using apparent resistivity maps and cross-sections and through the direct inversion of complete and partial Schlumberger soundings. The geophysical logs were used both for stratigraphic purposes and for computing formation factors and water resistivity in the sandstone tapped by the wells. From these results, it was possible to delineate the underground aquifer structure up to 50 m below the surface, to estimate some of its petrophysical characteristics and to infer typical groundwater contaminations occurring in both areas.*

Key words: Electrical resistivity; Groundwater; Pollution; Petrophysics.

Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica; Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia,
Rua Caetano Moura, 123, Federação 40210-350 Salvador, BA.

INTRODUÇÃO

O emprego de métodos geofísicos elétricos como procedimento de avaliação direta da contaminação de aquíferos depende, sobretudo, do contraste de resistividade entre os fluidos nativo e invasor, assim como, da dimensão e localização da pluma contaminante. Processos de poluição associados aos fluidos efluentes de trabalhos de exploração de depósitos minerais e de petróleo, assim como de vários tipos de resíduos industriais têm sido detectados, acompanhados e modelados pelo uso de técnicas geo-elétricas (Buselli et al., 1990; Barker, 1990).

Este trabalho apresenta os resultados obtidos com levantamentos geo-elétricos de detalhe realizados para a Companhia Geohidro Engenharia Ltda, com o objetivo de delinear a conformação estrutural e as condições hidrológicas "in situ" sob duas áreas localizadas no Pólo Petroquímico de Camaçari (COPEC): uma correspondente à área da Cetrel (empresa responsável pelo tratamento e despejo dos efluentes industriais do pólo), onde estão sendo implantadas novas bacias de tratamento e de manejo das lamas residuais produzidas nas indústrias; a outra envolvendo uma área em torno da fábrica Polialden, produtora de fibras de polietileno, localizada bem no centro industrial do Pólo. Ambas as áreas estão situadas sobre rochas detríticas das formações Marizal e São Sebastião, pertencentes ao Super-Grupo Bahia da bacia Recôncavo-Tucano.

Estão atualmente implantadas no COPEC mais de 50 indústrias, das quais 27, do chamado complexo básico, produzem componentes petroquímicos, enquanto as demais são transformadoras e/ou aplicadoras desses produtos. O potencial de impacto ambiental, associado a essa concentrada atividade industrial, pode ser avaliado pelos seguintes indicadores: i) emissão elevada de gases poluentes para a atmosfera (estima-se, por exemplo, que 150 toneladas de dióxido de enxofre são lançadas por dia, na área do COPEC); ii) despejo superficial de resíduos industriais que já alcançam e são distribuídos pelo sistema de drenagem superficial; iii) despejo de usinas de açúcar, da exploração de campos petrolíferos e dos esgotos domésticos das cidades de Camaçari e Dias D'Ávila (cujas populações somadas alcançam hoje 200 mil habitantes), que também são dispersados através das bacias de drenagem da região. Um dos objetivos da Cetrel é o de fazer um tratamento nos rejeitos das indústrias, uma parte sendo reciclada como fertilizante orgânico e, o restante, os efluentes líquidos, lançados em alto mar através de uma adutora de mais de 20 km de extensão. Os trabalhos geofísicos

ora apresentados integram-se a uma estratégia maior da Cetrel para atingir esses objetivos.

Os trabalhos foram dirigidos basicamente para delinear a configuração subterrânea dos principais níveis aquíferos nos primeiros 50 m abaixo da superfície nas duas áreas citadas, estimar algumas das propriedades petrofísicas dos arenitos e de suas águas intersticiais, assim como verificar a possibilidade de detectar processos de poluição subterrânea relacionados com a atividade industrial, usando métodos geo-elétricos de baixas frequências. Na área da Cetrel, buscou-se também identificar as condições geofísicas iniciais de referência, visando balizar um esquema de monitoramento e de proteção dos recursos hídricos subterrâneos em volta daquela área. Espera-se, com isso, demonstrar as vantagens da aplicação da eletro-resistividade, em conjunto com técnicas hidrológicas convencionais, como um procedimento otimizado para monitorar a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos em áreas de elevados riscos de contaminação.

No total, foram realizadas 21 sondagens elétricas verticais Schlumberger completas, com máxima separação entre eletrodos de corrente de 300 m e, oito seções de resistividade aparente, obtidas através de 85 sondagens elétricas parciais em seis níveis progressivos de investigação de 10 a 100 m de separação entre os eletrodos de corrente. Em suporte a esse trabalho de superfície, foram utilizados perfis geofísicos de furos exploratórios de água subterrânea e de petróleo, em geral, consistindo dos perfis de indução, potencial espontâneo e de micro-resistividades. Foram usados também dados litológicos desses furos e dos poços piezométricos de 10 m de profundidade, perfurados nas duas áreas como parte dos trabalhos de monitoramento em execução, bem como medidas de resistividade elétrica de amostras de águas coletadas nesses poços.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROLÓGICA

O Super-Grupo Bahia compreende uma espessa sequência de arenitos, folhelhos e calcários que preenche um sistema de fossas tectônicas Eo-Cretácicas, referidas como bacias do Recôncavo-Tucano, e originadas durante a separação continental entre a América do Sul e a África (Milani & Davison, 1988). Nas áreas estudadas e no intervalo de profundidade investigado ocorrem a Formação Marizal superposta, em discordância angular, à Formação São Sebastião (Fig. 1).

A Formação Marizal é caracterizada por níveis de conglomerados basais maciços ou estratificados, por arenitos variegados normalmente caulínicos e contendo, localmente, folhelhos e argilitos. Sua espessura, no Recôncavo, não ultrapassa 50 m. Trata-se de uma unidade pós-rifteana, depositada em sistemas fluviais e de leques aluviais (Lima, 1991).

A Formação São Sebastião é constituída por intercalações de espessos bancos de arenitos estratificados de cor e granulação variadas, e de camadas e lentes de folhelhos, siltitos e calcários. Sua espessura pode alcançar mais de 2000 m no Recôncavo, sendo que seus 1000 m superiores estão, em geral, saturados de água doce. Compreendem depósitos fluviais do final da fase rifteana, os arenitos representando sistemas de barras de pontais coalescentes e, os folhelhos, depósitos de planície de inundação (Lima & Miranda, 1988).

O movimento da água subterrânea no sistema aquífero superior da área do Pólo de Camaçari é controlado tanto pela topografia do terreno quanto pelo mergulho dos estratos. Em geral, esse fluxo alimenta as correntes superficiais da área. Lima & Miranda (1988) observaram um padrão geral de fluxo divergente centrado na área de recarga do aquífero, correspondente à região de afloramento da Formação Marizal, com um gradiente médio de 5 m/km em direção às bacias dos rios Joanes e Capivari (Fig. 1).

GEOFÍSICA DE POÇO

Um total de 95 perfis elétricos corridos em poços perfurados na região do Pólo Petroquímico de Camaçari foi estudado por Lima & Miranda (1988) como parte de um trabalho de avaliação regional das condições hidrogeofísicas dos aquíferos artesianos da região. No presente estudo, alguns desses perfis foram revistos num sentido mais específico, objetivando construir um substrato para a interpretação dos levantamentos geofísicos superficiais discutidos mais adiante.

A Fig. 2 contém as colunas litológicas do poço PLD I, perfurado visando o suprimento de água da Polialden, e do poço RJST-1, localizado na área do Pólo e perfurado com fins de exploração petrolífera (ver Fig. 1). Essas colunas foram obtidas da análise dos conjuntos de perfis geofísicos neles corridos, os quais também estão esboçados na Fig. 3. Por essa figura podemos ver as principais características geo-elétricas das formações Marizal e São Sebastião, bem como extrair algumas informações úteis sobre as propriedades petrofísicas dos arenitos e sobre a salinidade de suas águas de saturação.

A superfície de contato entre as formações Marizal e São Sebastião é visível no perfil composto da Fig. 2a através de fortes variações nas curvas de micro-resistividade, em torno de 20 m de profundidade. Imediatamente acima deste contato ocorrem níveis conglomeráticos pouco permeáveis, conforme se constata a partir da descrição de amostras de calha e da ausência de separação entre as curvas de micro-resistividade. Os arenitos Marizal, acima deste intervalo, são mais grosseiros e parecem mais permeáveis que os da Formação São Sebastião subjacente. O perfil de RJST-1 foi corrido no intervalo de 50 a 1000 m de profundidade, de modo que seus registros elétricos já começam abaixo da Formação Marizal.

Na Formação São Sebastião, o forte contraste de resistividade entre arenitos e folhelhos torna fácil demarcar seus contatos nos perfis. Normalmente, cada corpo principal de arenito, lateralmente contínuo e com dezenas a centenas de metros de espessura, possui as porções basal e mediana de granulometria uniforme e mostra afinamentos granulométricos ascendentes como forma de transição para os folhelhos sobrejacentes. Essa gradação textural, detectada por amostragens durante a perfuração dos poços, é indicada nos perfis de SP e nos perfis de resistividade por uma forte descontinuidade basal, seguida por um patamar suave ou serrilhado e por uma rampa transicional em direção aos níveis de folhelhos superiores (Fig. 2).

Amostras selecionadas de testemunhos do poço RJST-1 indicam que os arenitos possuem, em geral, granulação fina a média, com grãos arredondados a sub-arredondados. São medianamente a bem classificados, pouco consolidados, predominantemente quartzosos e subordinadamente micáceos. Normalmente, contêm menos de 10 % de argilas disseminadas, principalmente caulinita. Os dados petrofísicos desses arenitos, determinados em laboratório pela PETROBRÁS, indicam que a porosidade varia de 24,7 % a 32,7 % e a permeabilidade intrínseca, de 196 a 2.832 mD (Lima, 1993). Valores médios para a seção representada são de 27,5 % e 1.870 mD, com desvios padrões de 1,88 % e 780 mD, respectivamente.

Os folhelhos e siltitos da Formação São Sebastião são de cores variadas, com predomínio dos cinza-esverdeados e avermelhados. Os níveis mais espessos são normalmente contínuos através da área, podendo ser representados como camadas (Lima & Miranda, 1988); muitos outros, todavia, ocorrem como corpos lenticulares de pequena extensão lateral.

Valores de resistividade das águas inclusas nos corpos de arenitos foram estimados a partir dos perfis de SP. Para

cada arenito, a deflexão do SP em relação à linha base dos folhelhos foi atribuída a potenciais eletroquímicos, sendo descrita pela equação (Schlumberger, 1972)

$$SP = -K \log \frac{R_{mf}}{R_{we}} \quad (1)$$

onde SP é a máxima deflexão ou SP estático, K uma constante igual a 71 para soluções de NaCl a 75° F, R_{mf} a resistividade do filtrado da lama do poço (normalmente fornecida no cabeçalho do perfil), e R_{we} uma resistividade equivalente da água em termos de uma solução pura de NaCl.

Uma relação empírica para converter R_{we} ao valor verdadeiro R_w de águas nativas da Formação S. Sebastião foi obtida por Lima & Ribeiro (1982) estudando um conjunto de perfis de poços da área de captação do Centro Industrial de Aratu, situado a 2,5 km a sudoeste do Pólo de Camaçari. Usando essa relação, obtivemos para os poços PLD I e RJST-1 resistividades de águas, respectivamente de 45 e 15,5 ohm-m, para os níveis aquíferos acima de 200 m de profundidade.

Valores de resistividade verdadeira (R_t) das formações são aproximadamente definidos pelo perfil de eletro-indução. Todavia, nos intervalos mais limpos dos espessos arenitos, as resistividades ultrapassam os limites de escala escolhidos durante a execução dos perfis estudados. Baseados na constatação da existência de uma correlação aparentemente potencial entre a curva de indução e a normal de 16", foi possível extrapolar valores de R_t para os intervalos de interesse. Usando valores de R_t assim estimados e de R_w derivados do SP , computamos fatores de resistividade da formação médios ($F = R_t / R_w$) para os arenitos superiores dos poços PLD I e RJST-1 de 13,1 e 12,2, respectivamente.

Assumindo que os arenitos São Sebastião satisfaçam a Lei de Archie (Archie, 1942) dada por

$$F = \varnothing^{-m} \quad (2)$$

onde m é um parâmetro empírico referido como índice de cimentação, e usando o valor médio de \varnothing encontrado nas amostras de RJST-1 obtem-se, por substituição, $m = 1,95$ como valor típico para o índice de cimentação dos arenitos São Sebastião.

Por outro lado, supondo que nesses arenitos os fluxos de fluido e de corrente elétrica seguem o mesmo sistema de canais capilares sinuosos, podemos expressar suas

permeabilidades intrínsecas por meio da equação de Kozeny-Carman dada na forma (Brace, 1977)

$$k = \alpha_o F^{-(2m-1)/m} \quad (1)$$

onde α_o e m são parâmetros empíricos. Adotando os valores de k , F e m determinados para RJST-1 obtem-se $\alpha_o = 6,58 \times 10^4$ mD.

Desse modo, de posse dos valores empíricos de m e α_o , podemos usar dados de fatores de formação determinados a partir de perfis elétricos de poços ou de medidas elétricas tomadas na superfície, para obter estimativas da porosidade e da permeabilidade dos arenitos da Formação São Sebastião na região de Camaçari. Os dados do poço PLD I, por exemplo, permitem estimar uma porosidade de 27 % e uma permeabilidade de 1430 mD para os arenitos nele atravessados.

GEOFÍSICA DE SUPERFÍCIE

As sondagens elétricas verticais foram realizadas em pontos selecionados das áreas, que poderão ser reocupados em outras etapas do trabalho de monitoramento. A separação entre eletrodos de corrente no arranjo de Schlumberger variou progressivamente em escala logarítmica de 1 até 200 m. Nas Figs. 3 e 11 estão mostrados os centros dessas sondagens e as orientações de suas expansões. Algumas das sondagens foram executadas próximas a poços de monitoramento de 10 m de profundidade, construídos para permitir o controle das variações piezométricas e de qualidade das águas nas duas áreas como uma função do tempo.

Seções geo-elétricas transversais foram obtidas ao longo das linhas indicadas nas Figs. 3 e 11, usando um sistema multicabo para o dispositivo Schlumberger, com espaçamentos (AB/2) fixados em 5, 10, 15, 20, 30 e 50 m. Tais valores foram selecionados das sondagens elétricas como apropriados para amostrar satisfatoriamente a estratificação vertical de resistividades nas duas áreas. A distância entre as estações de cada linha levantada foi, em geral, de 50 m, exceto na linha central da área da Cetrel, na qual utilizamos distâncias de 30 m.

O equipamento utilizado, o sistema Terrameter da ABEM mod. 5312, opera com corrente alternada na frequência de 4 Hz e tem potência máxima de 1 kW. A fim de reduzir a resistência de contato entre os eletrodos (estacas cilíndricas de aço inoxidável) e o terreno, e aumentar a ra-

ção sinal/ruído durante a realização de uma medida, adotamos umedece o terreno em volta dos eletrodos com água salgada e, em algumas situações, usar pentes de eletrodos conectados em série como fontes de corrente.

Os dados de resistividade aparente obtidos nas transversais estão apresentados na forma de seções de pseudo-resistividade, assim como na de mapas de resistividade aparente para espaçamentos fixados do arranjo Schlumberger. Esses gráficos foram interpretados qualitativamente com base nos padrões de distribuição dos diferentes contornos em superfície e em profundidade. No caso dos mapas, os espaçamentos escolhidos refletem um aumento progressivo da profundidade investigada imediatamente sob o centro do arranjo de eletrodos utilizado. Nas pseudo-seções de resistividade, os pontos de atribuição dos valores medidos foram plotados diretamente abaixo de cada estação, a uma profundidade equivalente à do espaçamento usado na medição. Os dados de cada estação de leitura foram também interpretados como sondagens elétricas parciais assumidas, executadas sobre terrenos de estratificação subhorizontal, pelo menos na extensão coberta pela sondagem. A partir dessas interpretações aproximadas, se construiu seções geo-elétricas em profundidade real, conforme mostrado nas Figs. 10 e 15.

Na interpretação das curvas de sondagens elétricas foi utilizado um procedimento automático de inversão e ajuste, usando modelos teóricos de acamamento horizontal e um “software” integrado, desenvolvido pelo primeiro autor para uso em microcomputadores pessoais do tipo PC. Os modelos iniciais em cada iteração foram obtidos através de uma interpretação preliminar, usando curvas teóricas de duas camadas em conjunção com o método do ponto auxiliar (Zohdy, 1965), ou através de um processo automático, usando a função transformada da resistividade proposta por Koefoed (1979). Em linhas gerais, o processo interpretacional envolve os seguintes passos: I) os dados experimentais obtidos como conjuntos de ramos numa sondagem Schlumberger são suavizados, tornados contínuos (eliminação de embreagens) e re-amostrados em dois diferentes intervalos logarítmicos de 6 e 8 pontos por década, usando técnicas convencionais de interpolação numérica (Bevington, 1969); II) os valores amostrados em 8 pontos por década são usados num esquema de inversão iterativo, baseado num procedimento de obtenção da transformada da resistividade (Koefoed, 1979); III) as amostras em seis pontos por década são automaticamente invertidas usando um procedimento de regressão linear a partir de um modelo

inicial fornecido pelo intérprete; IV) o modelo de melhor ajuste aos dados suavizados é usado para calcular uma curva teórica a ser comparada aos dados experimentais. Em todos esses esquemas emprega-se o método da filtragem linear introduzido por Ghosh (1971) para avaliar integrais de convolução. A confiabilidade da solução final é garantida por uma comparação dos modelos interpretados com dados de furos realizados próximos a algumas das sondagens, assim como pela análise comparativa dos resultados de todas as sondagens.

A Fig. 7 contém informações ilustrativas do processo de interpretação das sondagens elétricas, mostrando desde os padrões de distribuição dos dados experimentais e os resultados dos vários passos de interpretação descritos acima, até a obtenção do modelo geo-elétrico final com a respectiva curva teórica ajustada aos dados suavizados.

Os dados de cada estação das pseudo-seções de resistividade foram tratados como sondagens elétricas parciais e também interpretados quantitativamente usando esse mesmo “software”. Todavia, dada a necessidade de maior interpolação, atribuímos menor confiabilidade aos resultados individuais e nos apoiamos fortemente na correlação lateral dos modelos entre si e com os das SEV completas. **Área da Cetrel** A área da Cetrel (Fig. 3) corresponde a um retângulo de aproximadamente 500 x 600 m de lados. Em sua configuração topográfica original, indicada por linhas tracejadas na Fig. 3, essa área foi parcialmente utilizada em experimentos da Cetrel para dispersão e despejo de lamas residuais (Nou, C., 1992, Comunicação verbal). Hoje, ela encontra-se aterrada e aplainada e com as bacias de decantação construídas conforme esquematizado na Fig. 3. Nessa área foram realizadas 9 sondagens elétricas verticais e 5 seções de resistividade aparente ao longo dos centros e caminhamentos indicados na figura.

As Figs. de 4 a 6 contêm os mapas de resistividade aparente construídos para os espaçamentos de eletrodos de corrente de 10, 30 e 50 m, a partir dos dados obtidos tanto nas sondagens elétricas parciais quanto completas. Pode-se verificar nessas figuras que a zona de solo acima do lençol freático (nível freático \approx 5 m) possui elevada resistividade (maior que 1000 ohm-m) e se espessa sensivelmente em direção ao setor W-NW da área. Uma expressiva anomalia condutora encontra-se bem delineada no centro-sul da área, em todos os níveis investigados. Seus contornos acompanham aproximadamente a topografia original do terreno e ela se torna lateralmente mais expandida nos espaçamentos intermediários do levantamento (Fig. 5).

As Figs. 8 e 9 mostram algumas das curvas de sondagens elétricas efetuadas na área e os modelos finais ajustados, assumindo existir uma estratificação sub horizontal na extensão coberta em cada sondagem. Em geral, as curvas possuem um comportamento regular e suave, compatível com essa suposição. Os modelos mais freqüentemente encontrados comportam de 4 a 5 camadas elétricas, as duas ou três primeiras representando a parte superficial não-saturada do solo, com resistividades variáveis e muito elevadas. O intervalo saturado, correspondente à Formação Marizal, se manifesta nas curvas como dois conjuntos distintos de valores de resistividade, um entre 200 e 600 ohm-m e outro de 1000 a 1800 ohm-m (curva SEVC-9, por exemplo). A Formação São Sebastião é, em geral, representada como um substrato ligeiramente mais condutivo, com resistividades normalmente em torno de 500 ohm-m.

A pseudo-seção de resistividade apresentada na Fig. 10 permite visualizar melhor a extensão da anomalia condutiva em profundidade. Ela revela também que, localmente, há regiões onde dificilmente o subsolo pode ser representado por modelos de acamamento horizontal. Tais locais são caracterizados por linhas de contornos quase verticais e com fortes gradientes de resistividade. Correspondem, muito provavelmente, a interfaces subverticais com mudanças de resistividade, presentes no subsolo aquífero até o limite alcançado com o maior espaçamento utilizado de AB/2 de 50 m.

A seção geo-elétrica vertical mostrada sob a pseudo-seção foi obtida como resultado da interpretação quantitativa e da correlação lateral das sondagens elétricas parciais. Através dela, é possível inferir a configuração tridimensional da anomalia condutiva delineada nos mapas de resistividade aparente. O intervalo condutivo, com valores de resistividade variando entre 100 e 600 ohm-m, situa-se na parte superior da Formação Marizal, logo abaixo do nível estático. O restante dessa formação possui resistividades elevadas, normalmente acima de 1000 ohm-m. Os valores mais elevados provavelmente estão associados aos níveis conglomeráticos menos permeáveis, conforme observado no perfil elétrico do poço PLD I. A Formação São Sebastião normalmente se manifesta como um substrato algo mais condutivo, com resistividades em torno de 500 ohm-m, valores também consistentes com aqueles observados nos perfis elétricos de poços.

As colunas litológicas dos poços piezométricos perfurados até 10 m de profundidade, indicam existir alguma

variabilidade vertical de escala métrica na distribuição de argila na Formação Marizal, mas nenhuma variação lateral de porte foi observada até esse nível de profundidade que pudesse explicar a anomalia mapeada. Medidas de resistividade elétrica das águas dos furos próximos às sondagens elétricas SE-01, SE-02, SE-04 e SE-07 forneceram, respectivamente, os seguintes resultados, 5,70, 2,60, >10 e 1,10 ohm-m. Há, portanto, uma diminuição na resistividade da água contida na Formação Marizal por um fator da ordem de 10, indicando que a anomalia observada resulta de variações laterais de salinidade na água da formação.

Área da Polialden. A área da Polialden (Fig. 11), situada no setor industrial básico, inclui-se num retângulo de 500 m por 250 m de lados. Possui também topografia aplainada, sendo limitada a leste e norte pelas instalações das fábricas CPC (Companhia Petroquímica Camaçari, produtora de plásticos) e Pronor (Pronor Petroquímica S.A, produtora de petroquímicos e químicos intermediários). As linhas interrompidas no mapa da Fig. 11 representam os contornos da superfície freática na Formação Marizal em 1991, após a perfuração dos piezômetros rasos para amostragem indicados na figura. O fluxo subterrâneo no local se dirige de leste para oeste, parecendo haver uma forte influência do bombeamento nos poços profundos que abastecem a empresa.

A área das instalações industriais (ver Fig. 11) é caracterizada por uma densa rede de dutos metálicos aéreos, pelos quais circulam produtos e materiais de várias espécies, toda a instrumentação de controle e as chaminés da fábrica. Existem também alguns dutos subterrâneos envolvidos com a distribuição de energia para o sistema. Além disso, em torno da área externa à indústria, há uma rede de dutos aéreos e válvulas compondo o sistema de segurança da empresa contra incêndios. As fábricas vizinhas possuem instalações muito semelhantes. Esse conjunto de componentes metálicos pode constituir fontes de perturbação para as medidas geo-elétricas realizadas na área, caso não exista um isolamento efetivo da terra. Em função disso, procuramos localizar os centros das sondagens e o posicionamento dos eletrodos no terreno o mais afastado possível das linhas de dutos e das instalações industriais. Por outro lado, dada a densidade superficial desses elementos, é muito provável que eles produzam um efeito global mais ou menos uniforme superposto ao padrão relacionado com a distribuição normal da resistividade no subsolo. Tais precauções e suposições nortearam o trabalho geofísico realizado na Polialden.

Foram efetuadas na área 12 sondagens elétricas completas identificadas pelo prefixo SE, e 9 estações de sondagens parciais, identificadas pelo prefixo E (Fig. 11). Nas Figs. 12 e 13 são mostrados mapas de resistividade aparente para $AB/2=20$ m e $AB/2=50$ m, construídos com base nessas medidas. Observa-se nas duas Figuras o delineamento de uma região mais condutora na altura da zona das instalações industriais, e que se estende lateralmente para sul e norte da área investigada. Além dessa região anômala, observa-se que mesmo a zona aquífera do Marizal considerada normal, apresenta-se com resistividades bem menores que aquelas observadas para a mesma formação na região da Cetrel.

Na Fig. 14 são mostradas algumas das sondagens elétricas obtidas nessa área, juntamente com os modelos geo-elétricos a elas ajustados. As curvas possuem formas suavizadas compatíveis com modelos de acamamento horizontal, não apresentando quaisquer discontinuidades que possam ser relacionadas a efeitos laterais, tais como aquelas associadas à fixação de eletrodos de corrente próximos a tubos ou a qualquer outro corpo metálico na superfície, ou enterrado.

A pseudo-seção de resistividade e a seção geo-elétrica mostradas na Fig. 15 parecem, assim, refletir basicamente as características do subsolo na área estudada. Novamente, estão bem identificadas as componentes litológicas das formações Marizal e São Sebastião. A primeira vem representada como uma sucessão resistiva-condutiva, e a última como um

substrato homogêneo normalmente mais resistivo que o pacote sobrejacente. As descrições litológicas dos furos já efetuados na área não indicam a existência, na Formação Marizal, de qualquer variação composicional de porte capaz de justificar a variação observada da sua resistividade elétrica. Por outro lado, não tivemos disponíveis dados de resistividade elétrica das águas contidas na Formação Marizal capazes de explicar a fonte da anomalia observada.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As relações empíricas entre fator de formação, porosidade e permeabilidade encontrados para os arenitos aquíferos na área do COPEC podem ser muito úteis na avaliação da variabilidade petrofísica dessas rochas. A partir da interpretação acurada de dados elétricos obtidos em superfície e do conhecimento das resistividades das águas que saturam as rochas, é possível inferir distribuições de F , ϕ e k usando as equações (2) e (3) e os valores de m e α_p , conforme determinado.

Duas notáveis anomalias geo-elétricas condutivas foram delineadas no aquífero freático Marizal nas áreas da Cetrel e da Polialden. Os dados litológicos de furos executados nessas duas áreas permitem mostrar que tais anomalias não se associam à variações composicionais ou de argilosidade desses arenitos. Há fortes evidências de que elas resultam de variações laterais na salinidade das águas de saturação. Em outras palavras, elas não refletem varia-

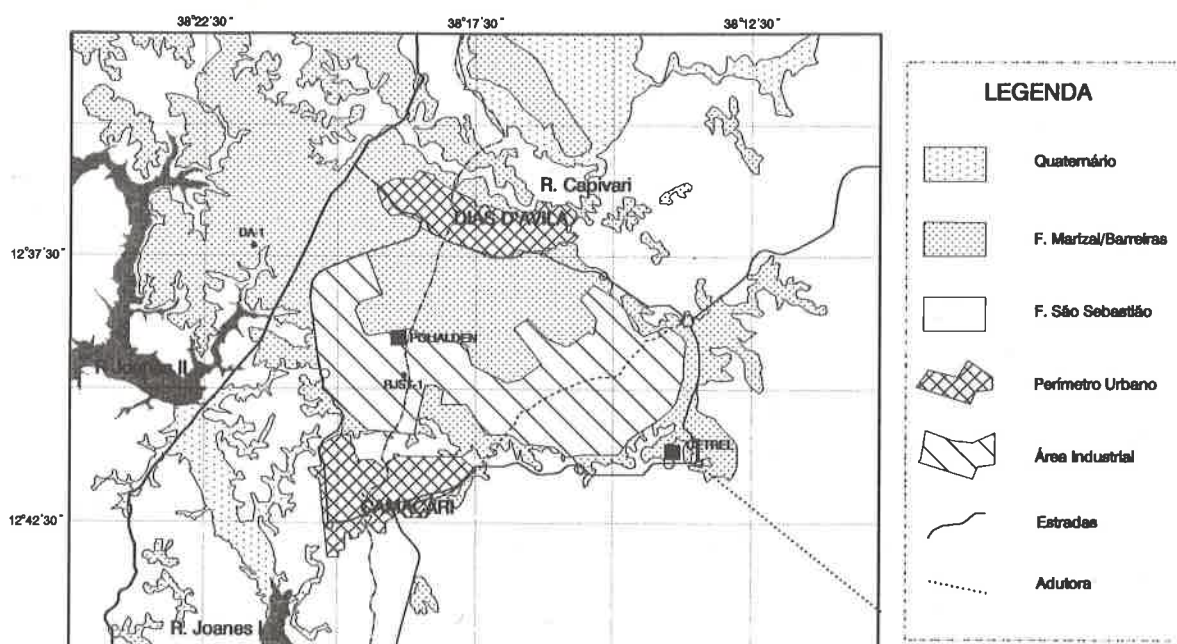


Figura 1 - Mapa geológico e de localização das áreas estudadas no Pólo Petroquímico de Camaçari.

Figure 1 - Geological and location map of the studied areas in the Camaçari Petrochemical Center.

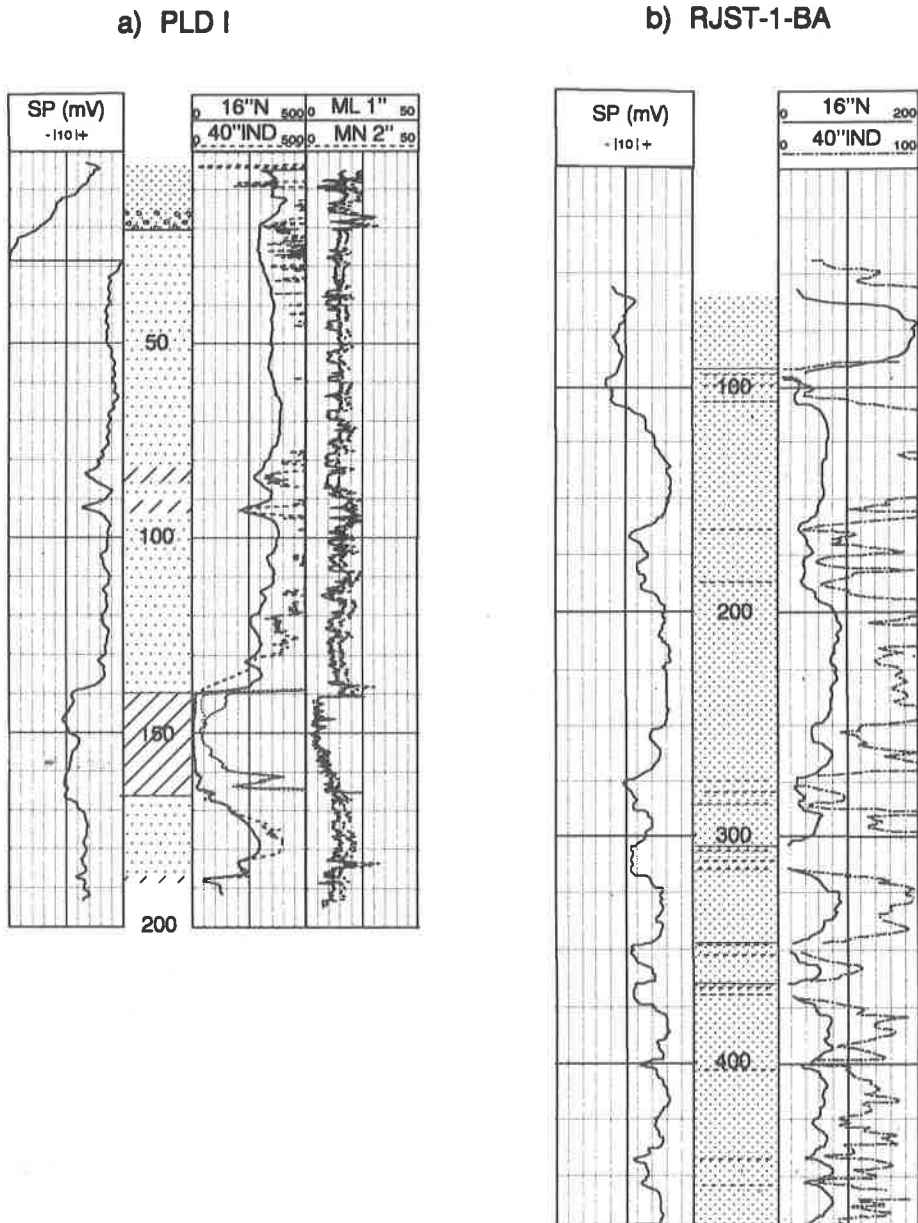


Figura 2 - Perfis geofísicos e colunas litológicas dos furos RJST-1 e PLD I.

Figure 2 - Geophysical and lithological logs of wells RJST-1 and PLD I.

ções apreciáveis em F mas sim em R_w . Esses fatos são apoiados pelas informações extraídas dos perfis geofísicos de RJST-1 e PLD I, somente que relativas à Formação São Sebastião.

O padrão de variação de R_w na área da Cetrel é o de um aumento de salinidade na direção do fluxo regional no aquífero. A zona anômala, a região de menor resistividade no aquífero, que também corresponde a de menor R_w , está parcialmente sobreposta a um nível mais resistivo, provavelmente de menor permeabilidade na for-

mação. Em alguns locais, todavia, a superposição é direta sobre os arenitos da Formação São Sebastião (Fig. 10).

O aumento de salinidade da água no aquífero freático da área da Cetrel pode estar associado a um processo natural, mas isso pressupõe a atuação de uma forte evapotranspiração no trecho em que o nível freático foi ou está quase aflorante (Fig. 3) ou a presença local de litologias salinas na Formação Marizal. Outra possibilidade é a de que esse aumento seja o reflexo de um processo artificial de salinização associado à filtração vertical de fluidos e

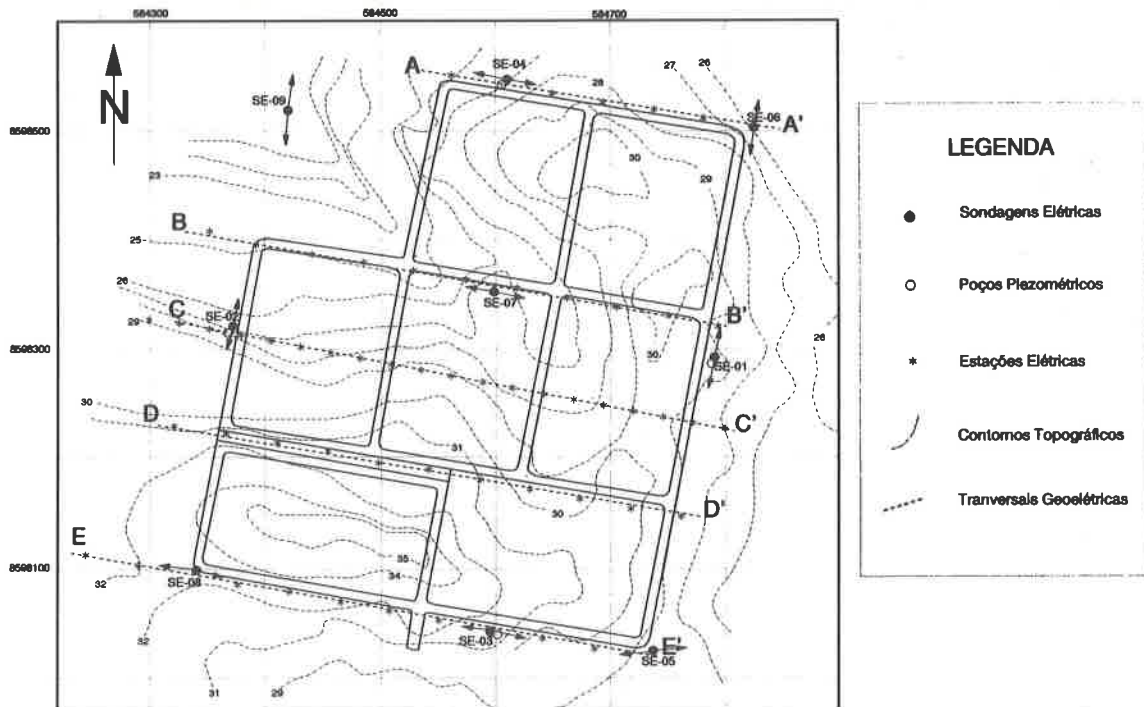


Figura 3 - Planta topográfica dos tanques de lama da Cetrel mostrando a disposição das estações de medidas geo-elétricas. As flechas indicam as orientações das expansões.

Figure 3 - Topographical sketch of the Cetrel mud pits and geoelectrical measurement locations. Arrows indicate the directions of the expansions.

à própria penetração de lama durante as experiências de deposição efetuadas antes da construção das bacias atuais. Nesse caso, a contaminação teria alcançado uma boa parcela do sistema freático e estaria se propagando lenta e verticalmente para o sistema São Sebastião.

Na área da Polialden a zona condutiva situa-se na parte basal da Formação Marizal, tendo maior desenvolvimento fluxo acima relativamente a posição dos dois poços exploratórios da empresa, um deles o PLD I. Caso represente uma variação composicional na água, esta estratificação de fluidos é gravitacionalmente estável e atesta uma salinização avançando no sentido do fluxo, mas provindo de uma região exterior, a leste da área da fábrica. Os dados de resistividades verdadeiras da Formação Marizal nesse setor do COPEC são, em geral, menores que os da área da Cetrel, sugerindo que os fluidos nativos do aquífero nesse trecho possuem maior teor de sais dissolvidos. Provavelmente, isso se deve a uma condição natural do fluxo sendo, portanto, independente de qualquer processo de contaminação.

O emprego de técnicas geo-elétricas de baixas frequências além de permitir delinear com riqueza de detalhes a configuração dos sistemas aquíferos Marizal e São

Sebastião, até profundidades da ordem de 50 m, permitiu também detectar a presença de corpos de águas salinizadas no aquífero Marizal. Tais corpos podem representar plumas de contaminação, diretamente relacionadas aos rejeitos de algumas das empresas que atuam na área do COPEC.

Os resultados obtidos permitem recomendar a execução de outras campanhas de levantamentos elétricos nas duas áreas, com o objetivo de detectar padrões de variações do sistema como uma função do tempo. Recomendamos também a realização de modelagens geo-elétricas bi-dimensionais desse sistema aquífero duplo, no intuito de aprimorar mais os modelos unidimensionais aqui apresentados.

Com base nos custos e na qualidade das respostas desses trabalhos geofísicos, quando comparados a resultados obtidos usando unicamente procedimentos hidrogeológicos convencionais, podemos afirmar que a inclusão da tecnologia geo-elétrica constitui uma das formas mais otimizadas para efetuar o monitoramento e proteger a qualidade dos recursos hídricos em áreas de elevados riscos de poluição subterrânea, como a do Pólo Petroquímico de Camaçari.

Resistividade Aparente para AB/2 = 10m

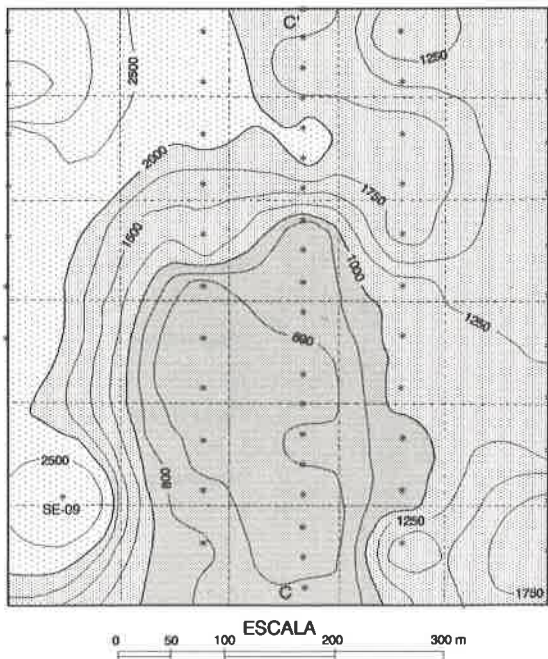


Figura 4 - Mapa de iso-resistividade aparente para AB/2 igual a 10 m na área da Cetrel. Valores em ohm.m.

Figure 4 - Pseudo-resistivity map for AB/2 equal to 10 m in the Cetrel area, values in ohm.m.

Resistividade Aparente para AB/2 = 30m

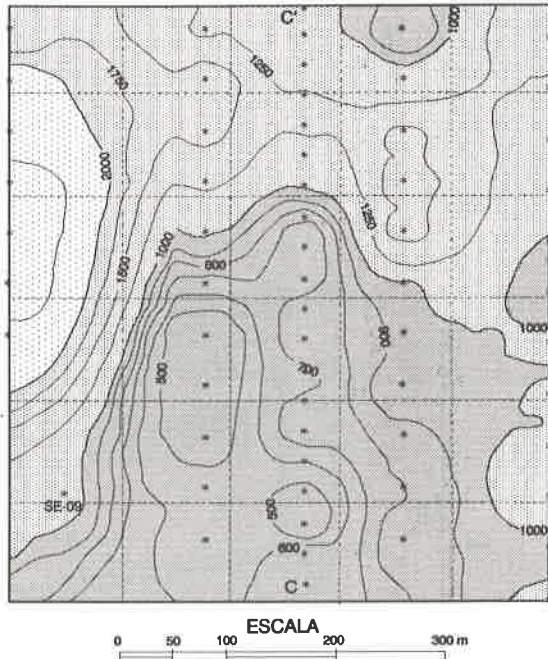


Figura 5 - Mapa de iso-resistividade aparente para AB/2 igual a 30 m na área da Cetrel. Valores em ohm.m.

Figure 5 - Pseudo-resistivity map for AB/2 equal to 30 m in the Cetrel area, values in ohm.m.

Resistividade Aparente para AB/2 = 50m

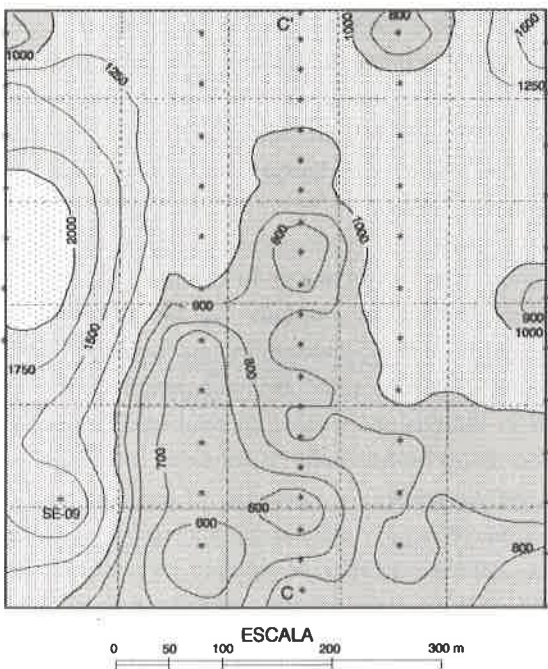


Figura 6 - Mapa de iso-resistividade aparente para AB/2 igual a 50 m na área da Cetrel. Valores em ohm.m.

Figure 6 - Pseudo-resistivity map for AB/2 equal to 50 m in the Cetrel area, values in ohm.m.

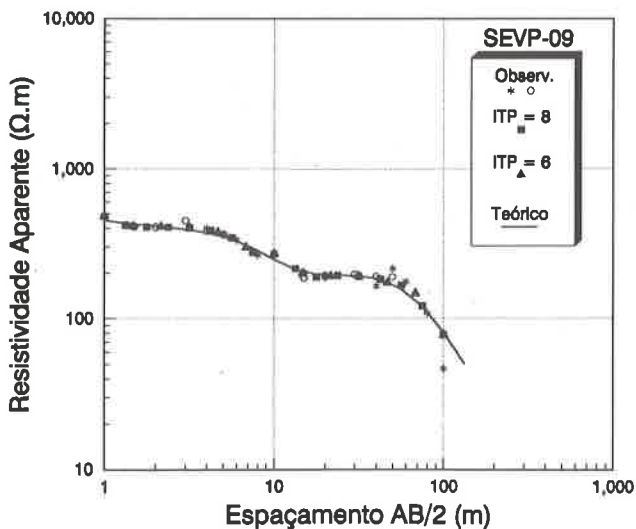


Figura 7 - Curva de sondagem elétrica mostrando o esquema de interpretação utilizado.

Figure 7 - Vertical electrical sounding showing the interpretation scheme used in the work.

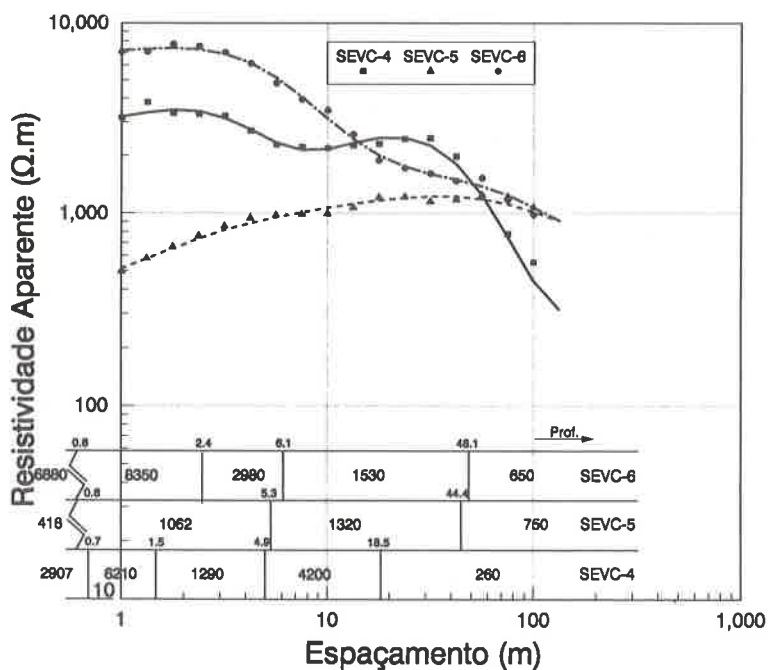


Figura 8 - Curvas de sondagens elétricas típicas da área da Cetrel, ajustadas aos modelos geo-elétricos de camadas horizontais.
Figure 8 - Typical vertical electrical sounding curves of the Cetrel area, fitted to horizontally layered earth model.

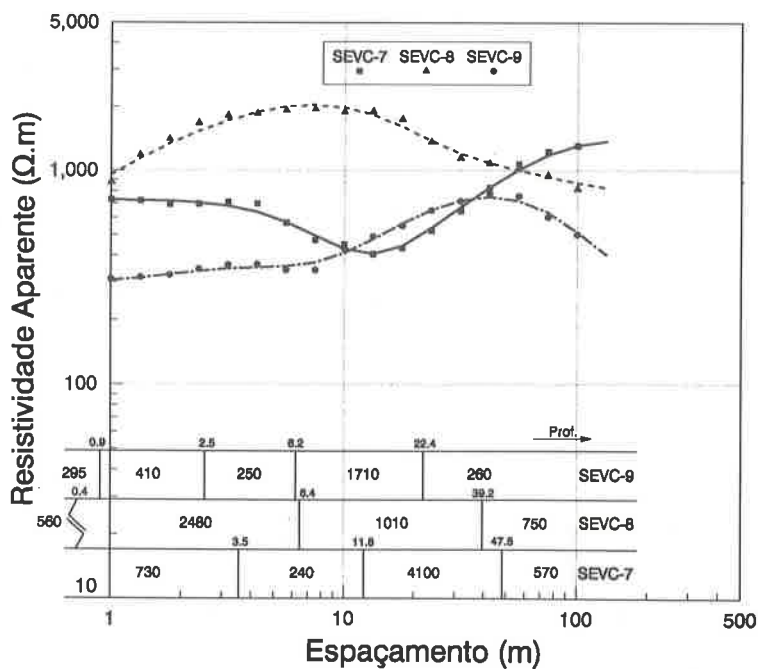


Figura 9 - Curvas de sondagens elétricas típicas da área da Cetrel, ajustadas aos modelos geo-elétricos de camadas horizontais.
Figure 9 - Typical vertical electrical sounding curves of the Cetrel area, fitted to horizontally layered earth model.

Seção Transversal C - C'

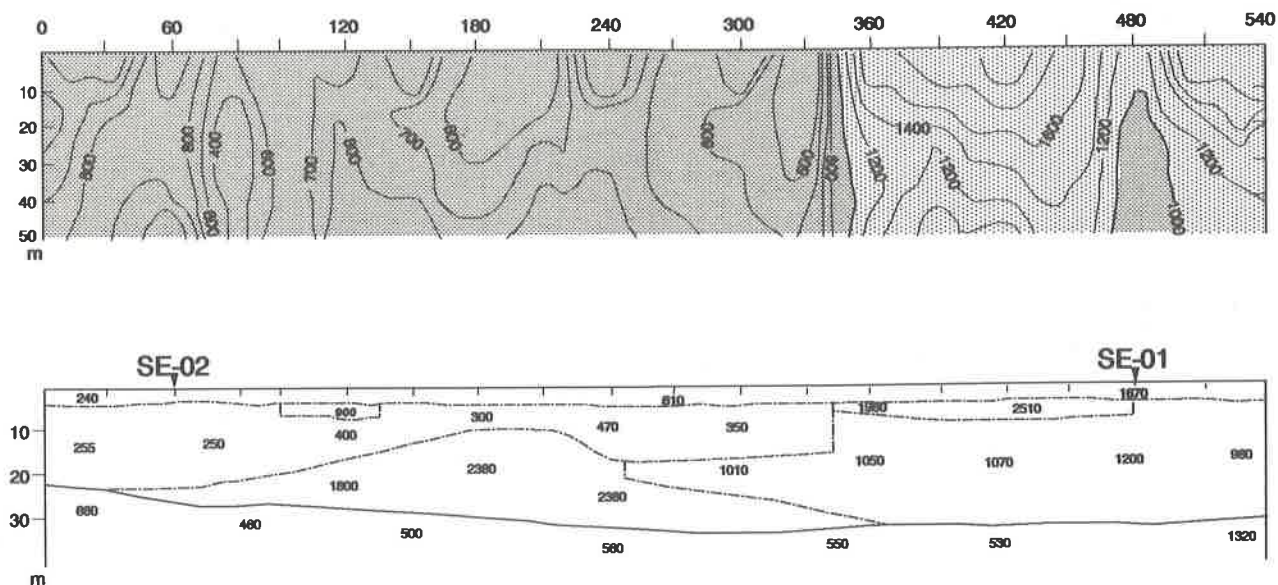


Figura 10 - Seção transversal de pseudo-resistividade e perfil geológico interpretado para a linha C-C' na área da Cetrel.
 Figure 10 - Pseudo-resistivity traverse and geological profile interpreted for line C-C' in the Cetrel area.

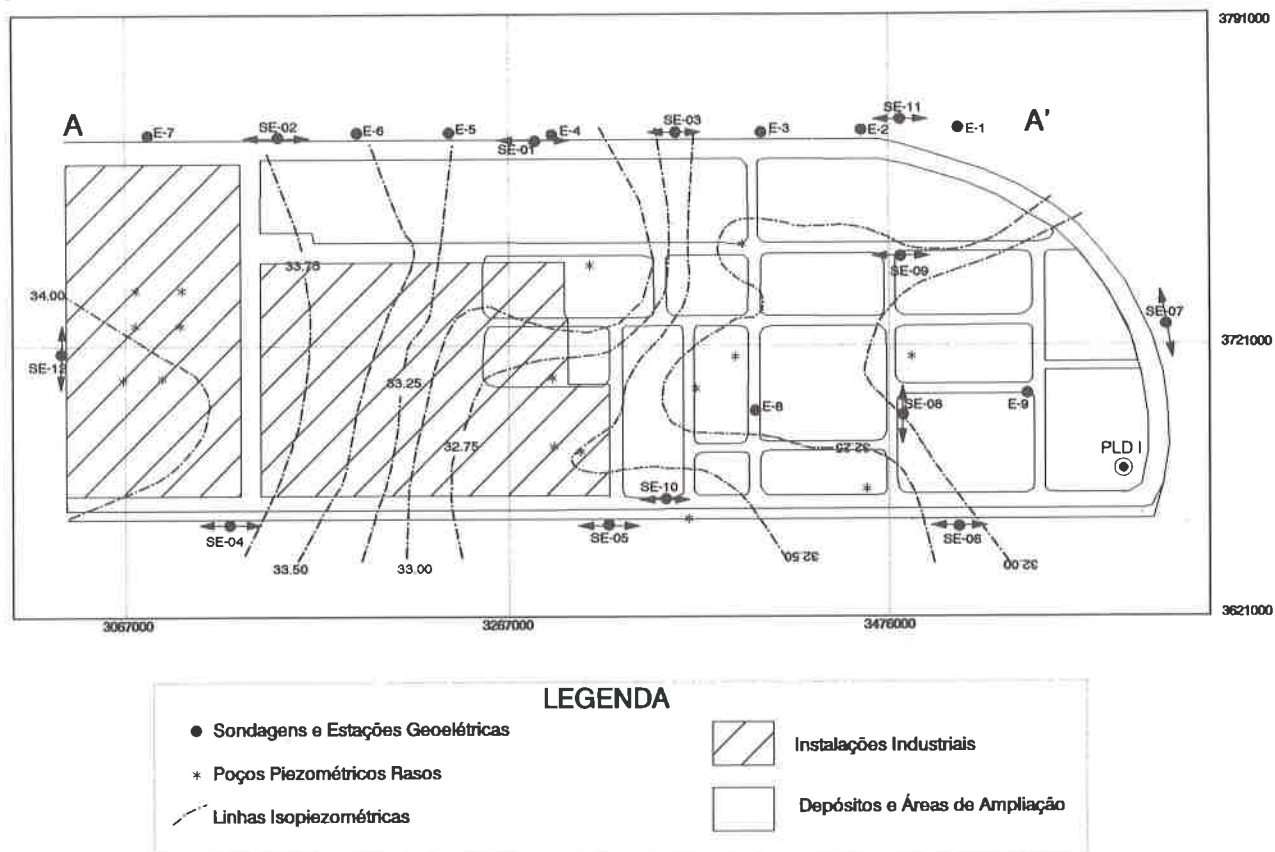


Figura 11 - Planta planimétrica e configuração piezométrica em torno da fábrica Polialden mostrando a disposição das estações de medidas geo-elétricas. As flechas indicam as orientações das expansões.

Figure 11 - Planimetric map and piezometric configuration around the Polialden factory and geoelectrical measurement locations. Arrows indicate the directions of the expansions.

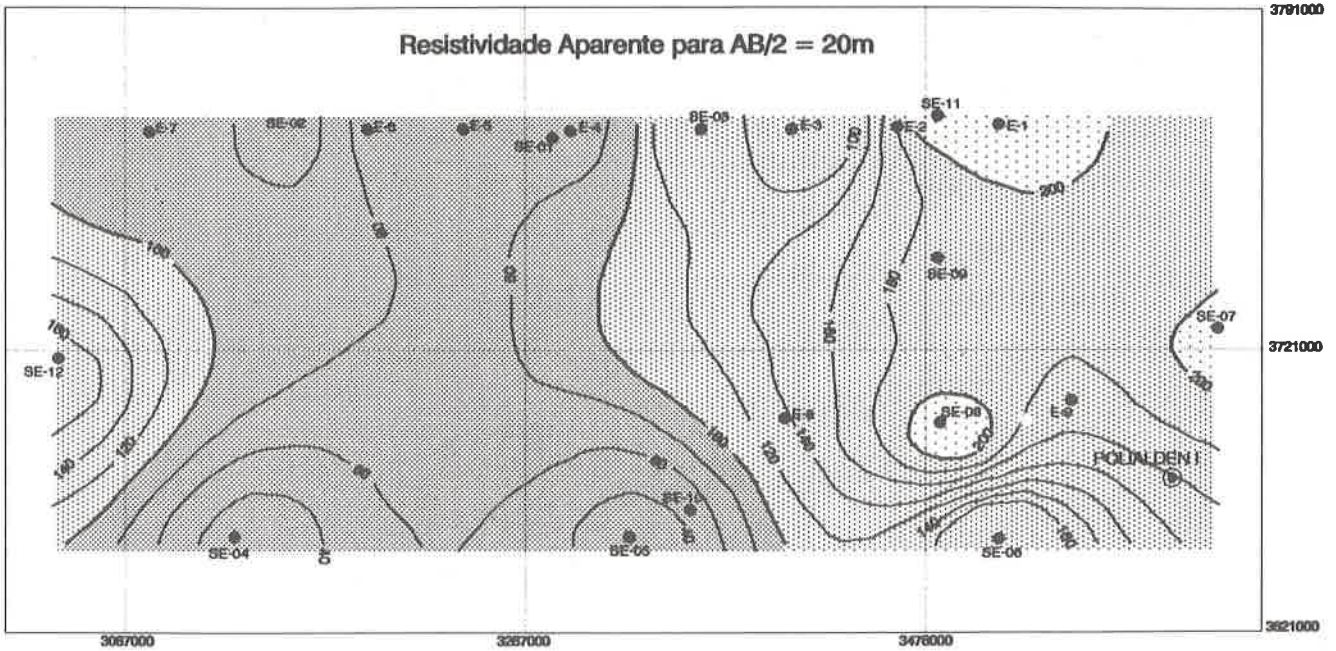


Figura 12 - Mapa de iso-resistividade aparente para AB/2 igual a 20 m na área da Polialden.

Figure 12 - Pseudo-resistivity map for AB/2 equal to 20 m in the Polialden area.

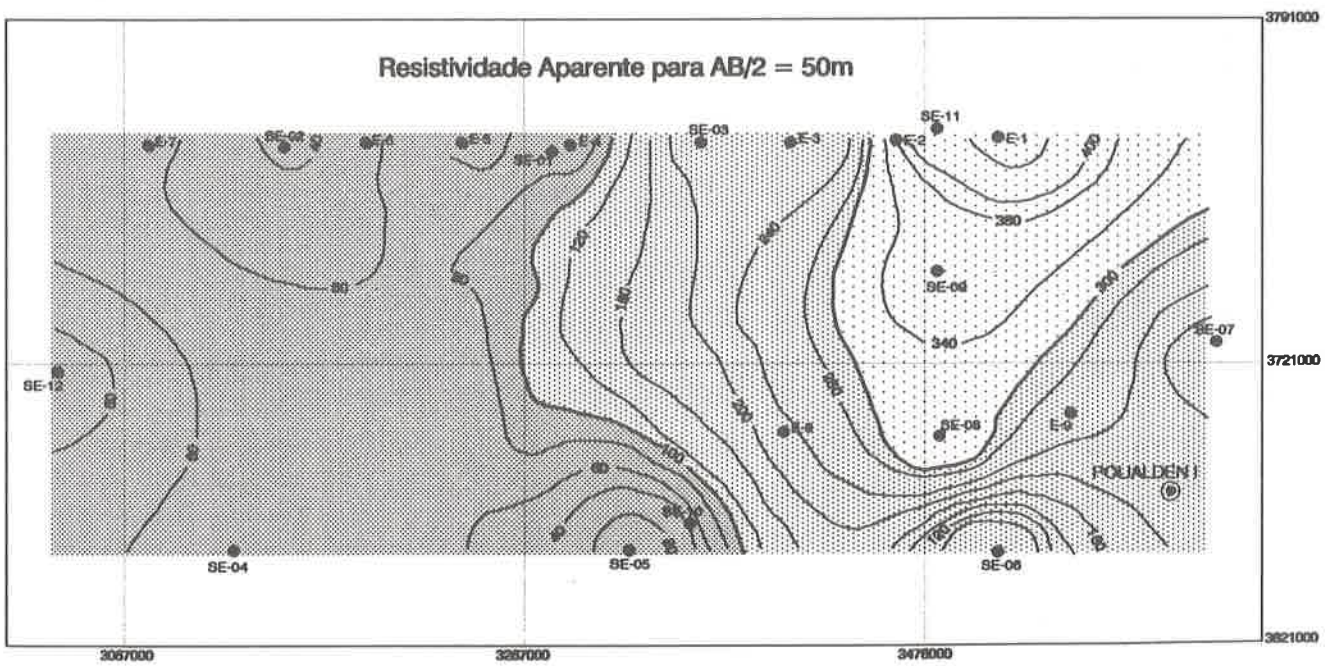


Figura 13 - Mapa de iso-resistividade aparente para AB/2 igual a 50 m na área da Polialden.

Figure 13 - Pseudo-resistivity map for AB/2 equal to 50 m in the Polialden area.

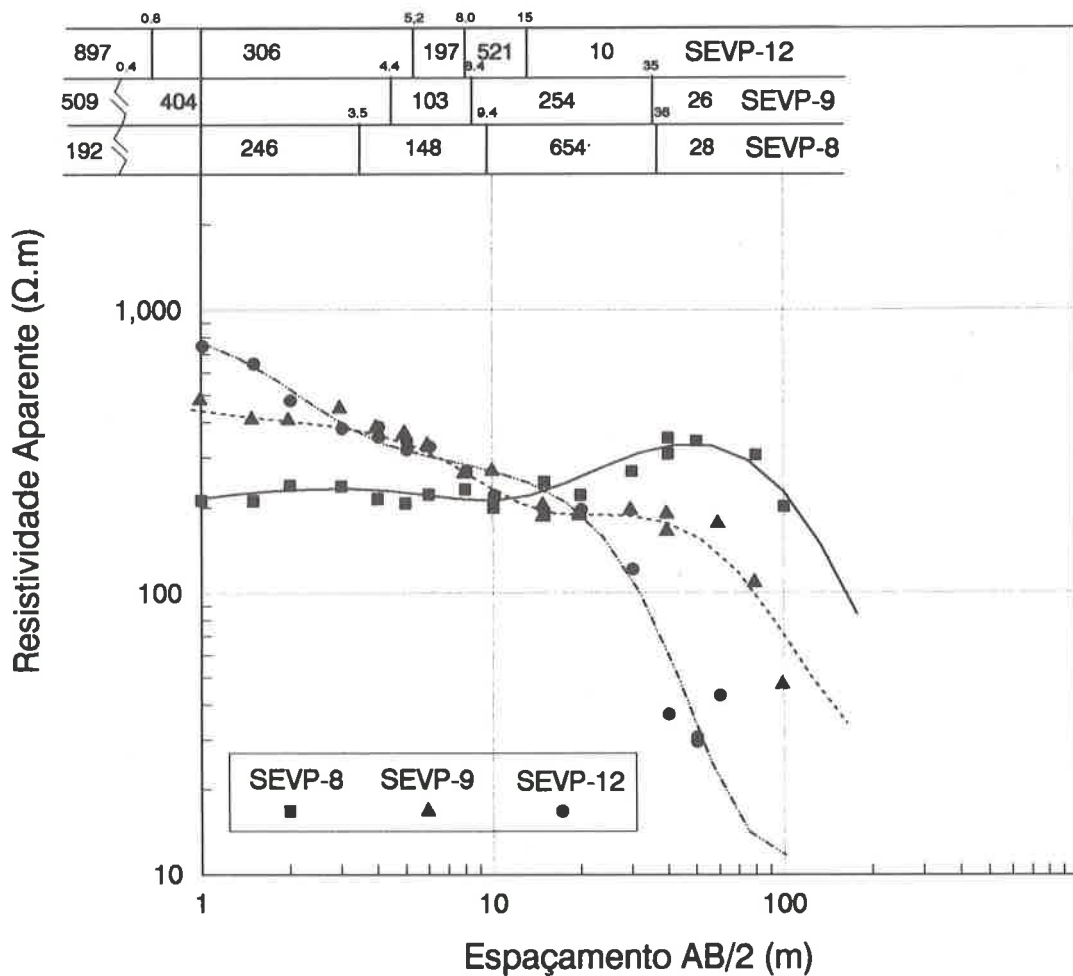


Figura 14 - Curvas de sondagens elétricas típicas da área da Polialden ajustadas a modelos geo-elétricos de camadas horizontais.
 Figure 14 - Typical vertical electrical sounding curves of the Polialden area, fitted to horizontally layered earth model.

Seção Transversal A - A'

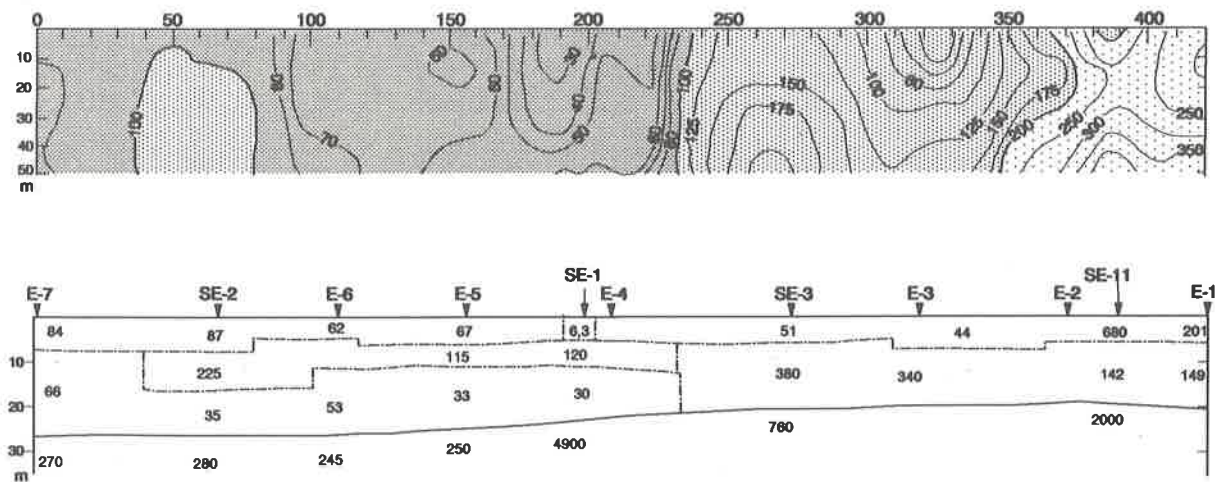


Figura 15 - Seção transversal de pseudo-resistividade e perfil geológico ao longo da linha A-A' na área da Polialden.
 Figure 15 - Pseudo-resistivity traverse and geological profile interpreted for line A-A' in the Polialden area.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Geohidro Engenharia Ltda, Cetrel - Central de Tratamento de Efluentes Líquidos e Polialden S.A. pela permissão e incentivo para divulgação deste trabalho geofísico. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte através de bolsas de pesquisa concedidas aos autores. Ao PPPG/UFBA por propiciar as condições adequadas para realização de trabalhos científicos.

REFERÊNCIAS

- ARCHIE, G. E.** - 1942 - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, **146**: 54-62.
- BARKER, R. D.** - 1990 - Investigation of groundwater salinity by geophysical methods. In *Geotechnical and Environmental Geophysics* (Ward, S. H., Ed.), Soc. Expl. Geophys. V. II: 201-211.
- BRACE, W. F.** - 1977 - Permeability from resistivity and pore. shape. *J. Geophys. Res.* **83**(23): 3343-3349.
- BEVINGTON, P. R.** - 1969 - Data reduction and error analysis for the Physical Sciences. McGraw-Hill Book Co.
- BUSELLI, G., BARBER, C., DAVIS, G. B. & SALAMA, R. B.** - 1990 - Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. In *Geotechnical and Environmental Geophysics* (Ward, S. H., Ed.), Soc. Expl. Geophys. V II: 27-39.
- DOBECKI, T. L. & ROMIG, P. R.** - 1985 - Geotechnical and groundwater geophysics. *Geophys.*, **50**(12): 2621-2636.
- GHOSH, D. P.** - 1971 - The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophys., Prosp.*, **19**: 192-217.
- KOEFOD, O.** - 1979 - *Geosounding Principles, I - Resistivity sounding measurements.* Elsevier 1ª Ed.
- KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C.** - 1966 - *Electrical Methods in Geophysical Prospecting.* Pergamon Press. 1ª Ed.
- LIMA, C. U.,** - 1991 - *Reconstrução arquitetural da Formação Marizal na bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil.* Tese de Mestrado em Geologia, UFBA, 115p.
- LIMA, O. A. L.** - 1993 - Geophysical evaluation of sandstone aquifers in the Recôncavo-Tucano basin, Bahia-Brazil. *Geophysics*, **58** (11): 1689-1702.
- LIMA, O. A. L. & RIBEIRO, A. C.** - 1982 - Caracterização hidrogeológica do aquífero São Sebastião na área de captação do CIA/BA, usando perfilagens elétricas de poços: *Rev. Bras. Geof.* **1**(1): 11-22.
- LIMA, O. A. L. & DIAS, C. A.** - 1983 - Application of geophysical methods to groundwater exploration in Bahia, Northeastern Brazil. *Proc. Internat. Symp. App. Geophys. Tropical Regions* (J. S. Lourenço e L. Rijo Eds.): 492-517.
- LIMA, O. A. L. & MIRANDA, T. A. D.** - 1988 - Condições hidrogeológicas dos aquíferos artesianos na região do Complexo Petroquímico de Camaçari, Bahia. *Rev. Bras. Geoc.*, **18**(1): 43-49.
- MAZAC, O., LANDA, I. & KELLY, W. E.** - 1987 - Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies. *Jour. Hydrol.*, **93**: 277-294.
- MAZAC, O., LANDA, I. & KELLY, W. E.** - 1989 - Surface geoelectrics for the study of groundwater pollution — Survey design. *Jour. Hydrol.*, **111**: 163-176.
- MILANI, E. J. & DAVISON, I.** - 1988 - Basement control and transfer tectonics in the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, Northeast Brazil. *Tectonophys.*, **154**: 41-70.
- SCHLUMBERGER** - 1972 - *Log Interpretation. Principles.* Schlumberger Ltd., New York.
- ZOHDY, A. A. R.** - 1965 - The auxiliary point method of electrical sounding interpretation and its relationship to the Dar Zarrouk parameters. *Geophysics*, **30**: 644-660.

Submetido em: 30/06/93

Revisado pelo(s) autor(es) em: 05/04/94

Aceito em: 28/05/94