

Abastecimento dos *campi* da UFPR por água subterrânea com base em imageamento elétrico 2-D e fotointerpretação

Francisco José Fonseca Ferreira e Rodoilton Stevanato (Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR)

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In Curitiba, the *campi* of the Universidade Federal do Paraná (UFPR) are built over ca. 50 m thick sediments of Guabirotuba Formation (Qpg, Curitiba Basin). Because of the poor yielding of Qpg wells, an electrical imaging survey was carried out to detect discontinuities in the Guabirotuba Formation's gnaissic-migmatitic basement favorable to the percolation of groundwater. The survey involved data from 7,460 m of 2-D electrical survey with dipole-dipole array and 40-50 m spacing between adjacent current and potential electrodes. The depth levels investigated with this electrode array were six and ten. Resistivity pseudosections and inversion models show an increment of resistivity with depth, which delineates the contact between the Guabirotuba Formation and its basement. The interpretation of the inverse models led to the identification of several discontinuities marked by resistivity values between 20-30 ohm.m as compared with values from the resistive basement (higher than 30 ohm.m). Wells were then located based on the coincidence of electrical discontinuities and geologic lineaments identified from aerial photographs. Four tubular wells were drilled in three of the UFPR *campi*, with the following results: Well 1 (Reitoria) – 232 m deep, outflow of 9 m³/h, water-bearing fractures at 180 and 222 m; Well 1 (Politécnico): 240 m deep, dry; Well 2 (Politécnico): 333 m deep, outflow of 5 m³/h, water-bearing fractures at 156 and 297 m; Well 1 (Botânico): 378 m deep, outflow of 9 m³/h, water bearing fractures at 154 and 374 m. The water from the wells at the UFPR *campi* were classified, according to physico-chemical analysis, as natural fluoridated mineral water. Global water expenses at UFPR have been reduced by 33% since the wells mentioned were drilled.

Introdução e caracterização do problema

Os custos médios anuais da Universidade Federal do Paraná (UFPR) com o pagamento de contas de água e esgoto, no período 1998-2001, giraram em torno de R\$ 1.000.000,00 (um milhão de reais). Nos últimos quatro anos, conforme pode-se observar na Figura 1, não obstante o consumo médio tenha se estabilizado ao redor de 300.000 m³/ano, os custos com água e esgoto saltaram de R\$ 685.544,60 em 1998 para R\$ 1.046.290,10 em 2001, portanto um incremento de 52%, refletindo o aumento das tarifas. Na tentativa de quantificar com precisão as despesas com contas de água e esgoto (estas últimas representam uma sobretaxa

de 80% em relação as primeiras), no ano de 2001, por *campus* da UFPR, foi realizada uma pesquisa com base nos dados da Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar, fornecidos pela Pró-Reitoria de Administração (PRA) da UFPR.

A Tabela 1 representa a síntese do consumo e das despesas com água, em m³ e reais, respectivamente, no ano de 2001, agrupadas nos diversos *campi* da UFPR. Nota-se na Tabela 1 que durante o ano de 2001 o consumo de água da UFPR foi de 273.654 m³, correspondente ao valor de R\$581.272,30, que acrescido da taxa de esgoto (80%) representou um montante de R\$1.046.290,10.

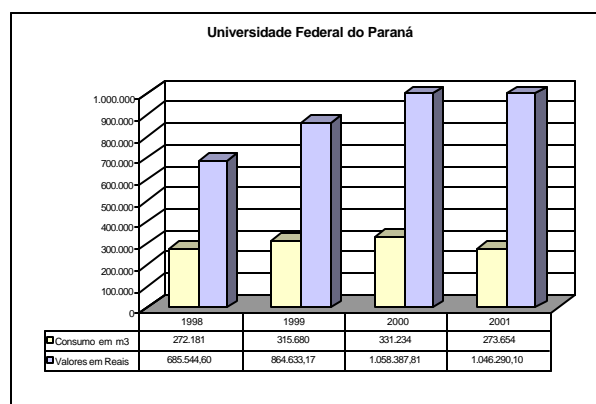


Figura 1 – Consumo e custos com água e esgoto na UFPR durante o período 1998-2001.

<i>Campi</i> da UFPR	Consumo (m ³)	Custo em Reais (R\$)
Centro Politécnico	153.980	587.045,01
Jardim Botânico	43.082	166.180,10
Ciências Agrárias	31.662	122.080,75
Reitoria	13.250	51.029,71
Hospital de Clínicas	10.128	38.474,57
Restaurante Central	8.321	31.275,68
Fazenda Cangüiri	4.957	18.900,32
Santos Andrade	3.654	14.009,40
DANC	2.329	8.901,25
Imprensa Universitária	663	2.378,48
PRHAE	442	1.652,97
Casa do Morador	440	1.645,56
PRA	434	1.596,38
Educação Física	238	865,73
Estudos do Mar	74	254,69
Totais (ano base 2001)	273.654	1.046.290,10

Tabela 1 – Distribuição durante o ano de 2001, por *campus* da UFPR, do consumo (m³) e dos custos (R\$) com contas de água (Fonte: Sanepar e UFPR).

iante deste quadro o Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA, com o apoio do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas – LPH, ambos do Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra da UFPR, conceberam o presente projeto de pesquisa, cujo principal objetivo é propor a execução de poços tubulares profundos visando minimizar os custos da UFPR com contas de água nos diversos *campi*. Neste trabalho são apresentados os resultados geofísicos obtidos nos *campi* da Reitoria, Centro Politécnico e Jardim Botânico. Estes três sítios da UFPR representaram cerca de 80% dos custos globais com água no ano de 2001 (Tabela 1). São apresentados também os resultados de quatro poços profundos já realizadas nos mencionados *campi*.

Contexto geológico

O embasamento da Bacia de Curitiba (Figura 2) é formado principalmente por migmatitos, subordinados por diversos tipos litológicos como paragneisses, quartzitos, micaxistos, anfíbolitos, granitos-gnáissicos e anfíbolitos, situados a oeste, norte e nordeste da bacia (Salamuni, 1998). As unidades geológicas que compõem este substrato pertencem a domínios estruturais distintos. A norte, os metassedimentos proterozóicos estão orientados segundo a direção NE-SW, e os migmatitos e gnaisses que ocorrem a norte, centro e sul, estão recortados por sistemas de falhamentos com direções NE-SW, N-S e E-W. Secionando todas estas litologias, ocorrem diques de dolerito dispostos segundo a direção NW-SE. Estes domínios estruturais integram grandes sistemas (Figura 3), que controlam várias bacias terciárias do sul-sudeste brasileiro (Riccomini, 1989).

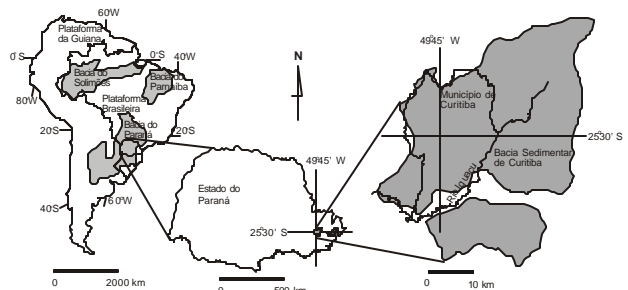


Figura 2 – Mapa de localização da Bacia Sedimentar de Curitiba (modificado de Salamuni, 1998).

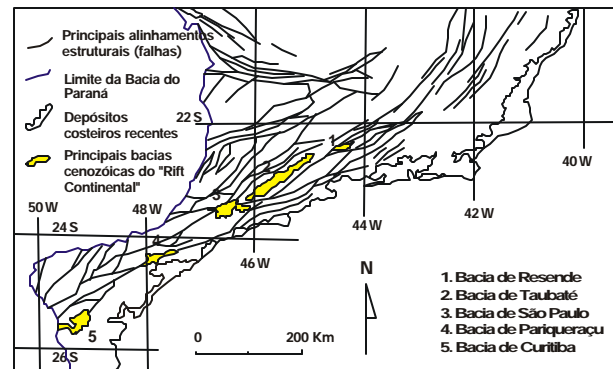


Figura 3 – Mapa de localização das bacias tafrogênicas do Rift Serra do Mar (modificado de Salamuni, 1998).

Contexto hidrogeológico

Os principais sistemas aquíferos da cidade de Curitiba e região metropolitana localizam-se em fraturas que recortam migmatitos e gnaisses, eventualmente associados a diques de dolerito; em lentes arcossianas da seção sedimentar da Bacia de Curitiba e em aluviões recentes (Nogueira Filho, 1997). Os *campi* da UFPR situam-se na Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba, a qual assenta-se sobre o embasamento gnáissico-migmatítico do escudo leste-paranaense (Figura 4). A Formação Guabirotuba é constituída por argilitos, arcósios, margas, areias e cascalhos, apresentando uma espessura média de 50 metros. Os argilitos são predominantes em toda a seção e apresentam intercalações de arcósios. Os arcósios possuem granulometria grossa, são sub-angulosos e apresentam coloração esbranquiçada a rosada. As lentes de arcósios mostram distribuição espacial esparsa e verticalmente sucedem-se ao longo do perfil, com espessuras centimétricas, embora raramente atinjam 20 metros, especialmente na base da coluna sedimentar, próxima ao contato com o embasamento cristalino (Nogueira Filho, 1997).

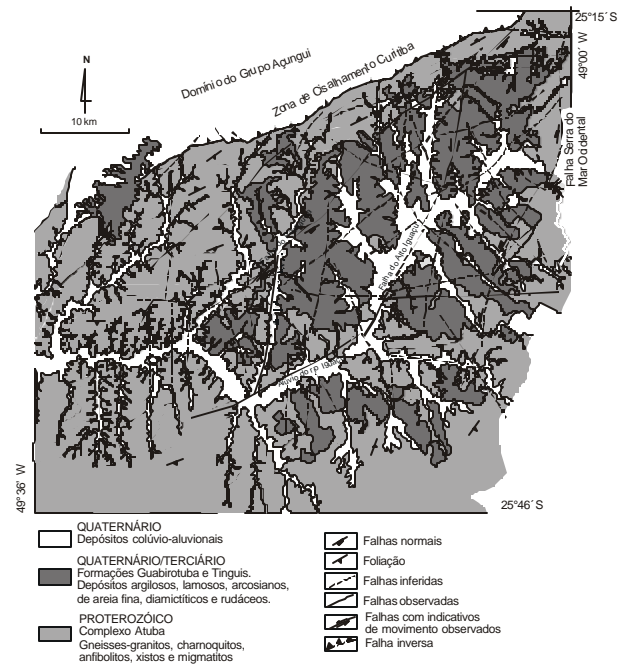


Figura 4 – Mapa geológico simplificado da Bacia de Curitiba e arredores (modificado de Salamuni, 1998).

Os aquíferos relacionados aos sedimentos da Formação Guabirotuba (Bacia de Curitiba) são considerados pouco promissores (Salamuni, 1981), apesar de vazões localizadas da ordem 80 m³/h (Rosa Filho *et al.*, 1996), tanto pela pouca expressão volumétrica dos reservatórios (lentes de arcósios), quanto pela qualidade das águas, as quais denotam elevados teores de ferro total (média de 0,72 ppm em 18 poços, Rosa Filho *et al.*, 1998), além de outras conseqüências relacionadas com a turbidez e a cor das águas. Neste sentido, a tendência atual é dirigir os estudos hidrogeológicos para a identificação de descontinuidades (fraturas) no embasamento da Bacia de Curitiba, favoráveis à percolação e armazenamento de águas subterrâneas. Considerando as dificuldades dos métodos convencionais para localizar tais descon-

tinuidades, julgou-se conveniente utilizar a técnica do imageamento elétrico 2-D, em conjunto com a fotointerpretação, para propor locações de poços tubulares profundos (Stevanato *et al.*, 2002).

Métodos

Os métodos empregados na prospecção de água subterrânea no embasamento cristalino da Bacia de Curitiba, levou em consideração vários critérios de locação como levantamentos geofísicos, fotointerpretação e geologia estrutural. No presente estudo procurou-se integrar estes diferentes critérios, com ênfase na interpretação geofísica, apoiada por fotointerpretação, visando selecionar sistemas de fraturas de direção N-S, interceptados por outros de direções NW-SE e NE-SW, considerados mais favoráveis à percolação e armazenamento de águas subterrâneas (Chaves, 2003).

Imageamento elétrico 2-D

O princípio dos métodos elétricos de prospecção é baseado na injeção, no terreno, de uma corrente I através de dois eletrodos (A e B) e na medida da diferença de potencial ΔV , entre outros dois eletrodos (M e N). A função resistividade aparente (ρ_a) é dada pela seguinte expressão:

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (1)$$

O fator K que multiplica $\Delta V / I$ é puramente geométrico e depende apenas da disposição dos eletrodos A, B, M e N. A resistividade aparente (ρ_a) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semi-espaço, para a qual contribuem os valores da resistividade em cada ponto, a geometria elétrica do terreno e a disposição geométrica dos eletrodos. O arranjo dos eletrodos normalmente utilizado neste tipo de levantamento é o dipolo-dipolo (mais sensível na identificação de estruturas verticais), onde a separação entre os eletrodos de corrente (AB) é a mesma dos eletrodos de potencial (MN). O arranjo gradiente, por sua vez, utiliza uma distância fixa (AB) entre os eletrodos de corrente e as medidas de diferença de potencial são procedidas em linhas paralelas (retângulo gradiente), não maiores que $L = AB/2$, ou em uma única linha (perfil gradiente). Diferentes níveis de profundidade são obtidos quando se utilizam vários espaçamentos AB. Os valores de resistividade aparente podem indicar, qualitativamente, fraturas no embasamento percoladas por águas subterrâneas, através do registro de decréscimos deste parâmetro. A maioria dos métodos geofísicos elétricos, com vistas à prospecção de águas subterrâneas, é realizada com o propósito de identificar áreas que possam ser testadas por métodos diretos, como os poços tubulares. Entretanto, poucos esforços têm sido feitos no sentido de explicar tais resultados em termos de modelos geofísico-geológicos.

Inversão

Todos os métodos de inversão tentam, essencialmente, encontrar um modelo cujas respostas estejam em conformidade com os dados medidos. No método calcado em células, os parâmetros são os valores de resistividade em blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores de resistividade aparente medidos. Sabe-se muito bem que para um mesmo conjunto de

dados há uma ampla variedade de modelos cujas resistividades calculadas se aproximam, em algum grau, dos valores medidos (ambigüidade). Além de tentar minimizar as diferenças entre os valores calculados e medidos, os métodos de inversão também procuram reduzir outros parâmetros que produzem certas características desejadas no modelo resultante.

Aquisição, processamento e interpretação dos dados

Os equipamentos utilizados na aquisição dos dados geofísicos incluem um sistema completo de polarização induzida e resistividade, fabricado pela *Iris Instruments* composto por um transmissor de alta potência (3000W), alimentado por um gerador e um receptor multicanal e espectral (*Elrec 10*). O processamento dos dados geofísicos foi realizado em ambiente computacional, através de pacotes comerciais.

Campus Reitoria

No *campus* da Reitoria os trabalhos que resultaram na locação do poço (Figura 5) foram baseados exclusivamente em fotointerpretação, uma vez que as edificações e os ruídos não permitiram proceder os ensaios de imageamento elétrico (Figura 6).

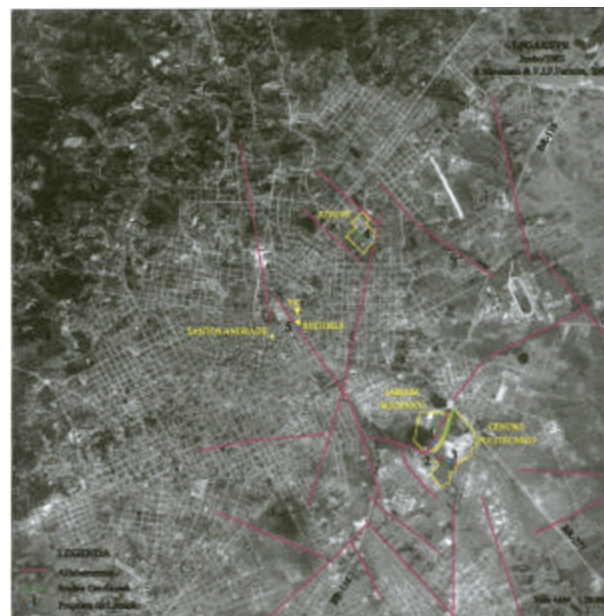


Figura 5 – Mapa de localização dos *campi* da UFPR indicando os alinhamentos fotointerpretados, as seções geofísicas e as propostas de locação de poços profundos.

Campi Centro Politécnico e Jardim Botânico

Os estudos de fotointerpretação foram realizados a partir de fotografias aéreas tomadas no ano de 1960, na escala 1:70.000, envolvendo conjuntamente os *campi* Centro Politécnico e Jardim Botânico. A localização destes *campi*, assim como os principais fotolineamentos são apresentados na Figura 6. Os estudos geofísicos foram realizados em alvos previamente selecionados pela fotointerpretação, a qual identificou duas direções principais de lineamentos, em torno de N30E e N70W.



Figura 6 – Localização do poço na *campus* Reitoria.

A direção N30E foi investigada através da técnica de imageamento elétrico 2-D, obtendo-se duas pseudo-seções de resistividade aparente e os modelos correspondentes. Uma delas, com 720 metros de extensão, foi implantada na direção SSW-NNE, denominada L1-Politécnico (Figura 7). A outra, designada L1-Botânico (Figura 7), estendeu-se por 320 metros na direção NW-SE. O arranjo utilizado no levantamento destas linhas foi o dipolo-dipolo, no qual empregou-se um espaçamento entre os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) de 40 metros, com seis níveis de investigação.

A Figura 8 (L1-Politécnico) mostra que os valores de resistividade aparente indicam que a variação vertical é bem maior do que a horizontal, refletindo uma coluna geoeletrica estratificada horizontalmente. Na seção de resistividade modelada (verdadeira), a tendência subhorizontal da distribuição da resistividade é mantida, mostrando que as camadas mais superficiais (até 50 metros) são menos resistivas (<15 ohm.m), ao passo que os níveis mais profundos (> 50 metros) são mais resistivos (>15 ohm.m). Do ponto de vista hidrogeológico, os poços PP1 e PP2 (Figura 6), perfurados na década dos 80, apesar de atingirem o embasamento a uma profundidade aproximada de 50 metros, foram improdutivos. Estas informações permitiram calibrar os modelos, ou seja, as baixas resistividades (tonalidades lilás) estão relacionadas aos sedimentos da Formação Guabirota, enquanto que as altas resistividades (tonalidades azul e branca) caracterizam o embasamento cristalino. Os dados geofísicos mostram que não existem variações laterais de resistividade no embasamento, do que decorre a ausência de descontinuidades verticais passíveis de circular águas subterrâneas, desta forma justificando a improdutividade dos poços, portanto sem propostas de locação até a profundidade investigada pela geofísica.

A Figura 9 (L1-Botânico) mostra que os níveis superficiais são caracterizados por baixos valores de resistividade. Já nos níveis mais profundos ocorre uma pequena variação lateral, indicando um núcleo mais resistivo no segmento ocidental.

A seção modelada revela o mesmo padrão indicado pela pseudoseção, porém salientando melhor a descontinuidade do embasamento, em torno da estação 200, com alto ângulo de mergulho. Esta feição geofísica coincide com a estrutura fotointerpretada, o que motivou a proposta de locação de poço tubular profundo.

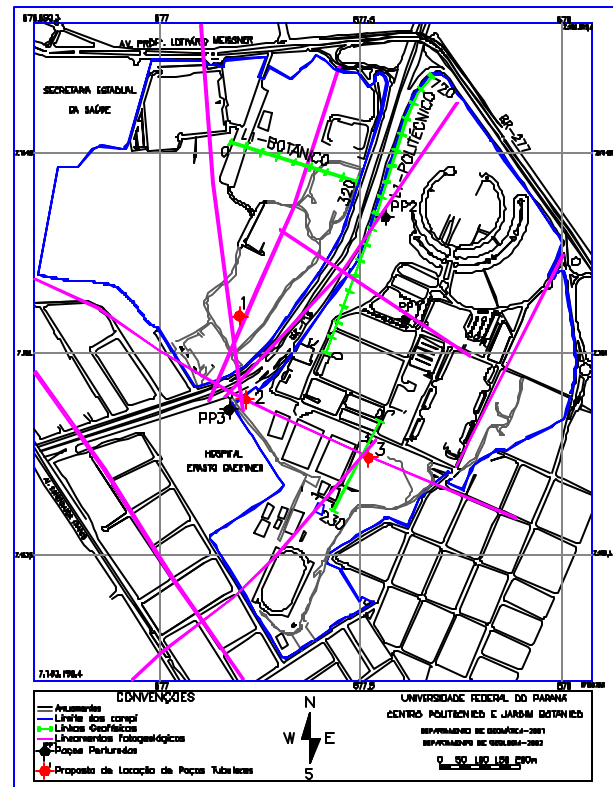


Figura 7 – Mapa dos *campi* Centro Politécnico e Jardim Botânico indicando a localização das linhas geofísicas, lineamentos, poços perfurados e locações propostas.

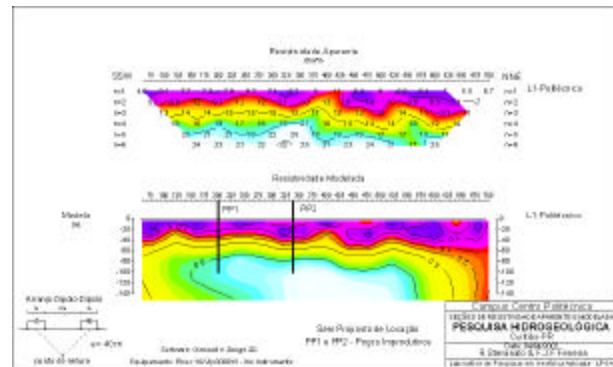


Figura 8 – Seções de resistividade aparente e modelada da Linha 1 (L1 - Politécnico).

A direção N70W foi pesquisada pela técnica do arranjo gradiente em apenas uma linha (perfil gradiente), onde foram empregados dois espaçamentos entre os eletrodos de corrente (AB = 170 e 230 m) e apenas um entre os eletrodos de potencial (MN = 10 m), permitindo investigar dois níveis de profundidade.

Os resultados obtidos (Figura 10) indicam uma excelente correlação entre os dois perfis, notando-se um decréscimo da resistividade aparente, sobretudo entre as estações 5 e 2.

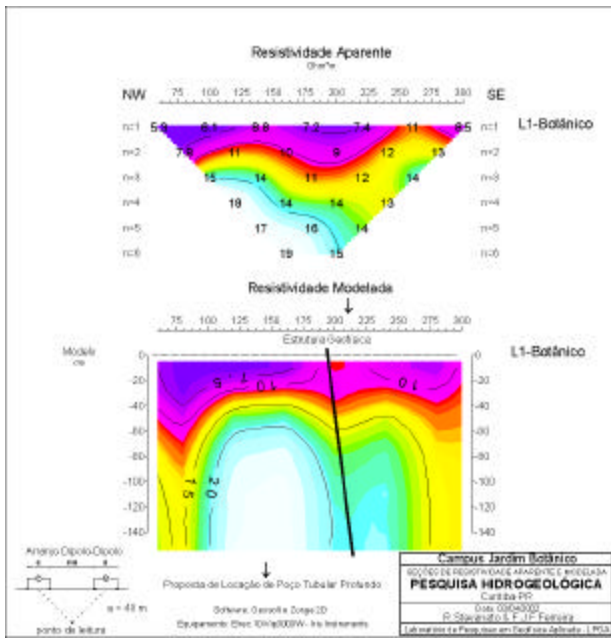


Figura 9 – Seções de resistividade aparente e modelada da Linha 1 (L1 – Botânico).

Esta última estação, com resistividades aparentes de 10,5 e 6,5 ohm.m, AB = 230 m e 170 m, respectivamente, coincidem com uma estrutura fotointerpretada, sugerindo que a mesma pode encerrar potencial para água.

Assim, com base nos resultados obtidos nos *campi* Centro Politécnico e Jardim Botânico, foram propostas 3 (três) locações conforme indicadas na Figura 7. Tais propostas foram embasadas tanto na interpretação geofísica, quanto na coincidência com cruzamentos de fotolineamentos. Deve-se observar na Figura 6 que a locação 2 está próxima do poço PP3, perfurado em agosto de 1996, em propriedade do Hospital Erasto Gaertner, cujo perfil descritivo mostra que o mesmo, com profundidade total de 150 metros, atingiu o embasamento a 53 metros, com entradas de água no intervalo 70-80 metros, fornecendo uma vazão de exploração de 3 m³/h.

Resultados

Campus Reitoria

O poço localizado no *campus* da Reitoria (Figura 6), atingiu uma profundidade de 232 metros, com entradas de água em 180 e 222 metros. Os níveis estático e dinâmico posicionaram-se, respectivamente, em 9,20 e 87,52 metros, enquanto a profundidade do crivo da bomba situou-se a 102 metros. A perfuração atravessou 5 metros da Formação Guabirota e permitiu uma vazão de exploração no teste de bombeamento (24 horas) de 11,314 m³/h e uma vazão de exploração de 9,0 m³/h, com um regime de bombeamento de 16 horas/dia.

Esta vazão foi cerca de três vezes superior às necessidades de abastecimento de água do complexo da Reitoria (Tabela 1). As análises físico-químicas realizadas pelo Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH/UFPR), classificaram a água como mineral natural fluoretada (teor de fluoretos de 0,68 mg/L). Os parâmetros analisados atendem aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria n° 1469/2000 do Ministério da Saúde.

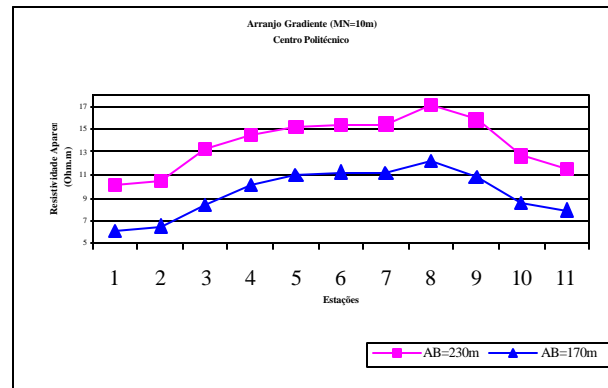


Figura 10 – Perfis gradiente no Centro Politécnico.

Campus Centro Politécnico

Foram realizadas duas perfurações no *campus* Centro Politécnico (Figura 7). O poço 1, improdutivo, atravessou 42 metros da Formação Guabirota e atingiu uma profundidade de 240 metros. Entre 174 e 240 metros a perfuração atravessou uma litologia identificada como apatita-titanoaugita gabro hidrotermalizado, identificada pela primeira vez sob os sedimentos da Bacia de Curitiba, o que motivou a suspensão da perfuração.

O poço 2 atravessou 18 metros da Formação Guabirota e atingiu uma profundidade de 333 metros, com entradas de água em 91, 156 e 297 metros, esta última principal. Os níveis estático e dinâmico, posicionaram-se, respectivamente, em 13,91 e 198,96 metros, enquanto a profundidade do crivo da bomba situou-se a 216 metros. A vazão de exploração no teste de bombamento (24 horas) foi de 5,0 m³/h e a de exploração 4,145 m³/h, com o mesmo regime de bombeamento já mencionado. Esta vazão é suficiente para abastecer apenas 20% das necessidades do Centro Politécnico, pelo que outro poço foi projetado. As análises físico-químicas realizadas pelo Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH/UFPR), classificaram a água como mineral natural fluoretada, com teor de fluoretos de 0,70 mg/L. Os parâmetros analisados atendem aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria n° 1469/2000 do Ministério da Saúde.

Campus Jardim Botânico

O poço do *campus* Jardim Botânico atingiu uma profundidade de 378 metros, com entradas de água em 154 e 374 metros, esta última principal. Os níveis estático e dinâmico, posicionaram-se, respectivamente, em 25,0 e 176,07 metros, enquanto a profundidade do crivo da bomba situou-se a 240,0 metros. A vazão de exploração no teste de bombeamento (24 horas) foi de 11,0 m³/h e a de exploração de 8,820 m³/h, com um regime de bombeamento de 16 horas/dia.

Esta vazão é suficiente para abastecer em torno de 90% o *campus* Jardim Botânico (Tabela 1). As análises físico-químicas realizadas pelo Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH/UFPR), classificaram a água como mineral natural fluoretada (teor de fluoretos de XX mg/L). Os padrões de potabilidade são os mesmos anteriores.

Conclusões

A aplicação conjunta das técnicas de imageamento elétrico 2-D e fotointerpretação, foram consideradas importantes para a locação de poços tubulares profundos nos *campi* da Reitoria, Centro Politécnico e Jardim Botânico da UFPR. Apesar dos níveis de investigação do método geofísico empregado não corresponderem às profundidades das entradas d'água registradas, foram perfurados 4 poços tubulares profundos, sendo 3 deles produtivos, com vazões significativas no ambiente hidrogeológico pesquisado (vazões no embasamento exposto entre 5 e 20 m³/h, com entradas de água a partir de 300 metros de profundidade), além da ótima qualidade das águas, como atestado pelas análises físico-químicas. Desta forma foi possível, até o momento, reduzir em 33% os custos globais da UFPR com contas de água.

Referências

Chavez, L., 2003, Análise da tectônica rúptil em rochas do embasamento da Bacia de Curitiba com vistas à determinação de áreas favoráveis à exploração de água subterrânea. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, UFPR, 193p.

Nogueira Filho, J., 1997, A Bacia Hidrogeológica de Curitiba. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, UFPR, 164p.

Riccomini, C., 1989, O *rift* continental do sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, 287p.

Rosa Filho, E.F., Paranhos Filho, A.C., Prazeres Filho, H.J., e Valaski, Z., 1996, Considerações sobre aspectos físicos e hidráulicos da Formação Guabirota na região nordeste de Curitiba. Boletim Paranaense de Geologia, Universidade Federal do Paraná, UFPR, v.44, p.35-50.

Rosa Filho, E.F., Bittencourt, A.V.L., e Hindi, E.C., 1998, Hidroquímica da Formação Guabirota na porção oriental da Bacia de Curitiba. Boletim Paranaense de Geologia, Universidade Federal do Paraná, UFPR, v.46, p.131-139.

Salamuni, R., 1981, Geologia da água subterrânea na região metropolitana de Curitiba. *In*: Simpósio Regional de Geologia, 3, Curitiba-PR, SBG, v.2, p.372-381.

Salamuni, E., 1998, Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Unesp, 211p.

Stevanato, R., Ferreira, F.J.F., Rosa Filho, E.F., e Hindi, E.C., 2002, Imageamento elétrico 2-D aplicado à exploração de água subterrânea no embasamento da Bacia de Curitiba, *In*: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 12, Florianópolis-SC, ABAS, (CD-ROM).

Agradecimentos

Os autores agradecem à alta administração da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo apoio financeiro para a construção dos poços tubulares profundos, aos geólogos José Roberto de Góis, Carlos Eduardo Dorneles Vieira, Carlos Vieira Portela Filho, Michael Strugale e

Maximilian Forlin pelo acompanhamento e estímulo durante o desenvolvimento da pesquisa, aos alunos das disciplinas de geofísica aplicada dos cursos de graduação e pós-graduação em geologia da UFPR pela colaboração durante os trabalhos de campo e aos Laboratórios de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH/UFPR) e de Minerais e Rochas (LAMIR/UFPR) pelas análises realizadas.