



## Estudos do avanço e recuo de intrusão salina correlacionados à sazonalidade através do uso de Tomografia de Resistividade Elétrica e GPR - Grumari - RJ

Raisa Cristina Rodrigues Alves<sup>1</sup>, Jonne Clay Fonseca Vidal<sup>1</sup>, Israeli Rodrigo Mathias dos Santos<sup>1</sup>, José Antônio Neves Pereira<sup>1</sup>, Alcides Antonio dos Santos<sup>1</sup>, Emanuele Francesco La Terra<sup>1</sup>, Observatório Nacional

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 16<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent 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

Good groundwater management is necessary for human life, fauna and flora, because of all the fresh water available for consumption, approximately 98% are in underground reserves stored in the rocks. Several contaminants may compromise the quality of these waters depending on the environment and, in this study, the focus is on coastal environments that may suffer from problems of brackish water contamination in aquifers due to the advancement of the salt wedge. Thus, the chosen study area was the Grumari Natural Park, in the western zone of Rio de Janeiro, which has one of the most beautiful and bustling beaches in the state: Grumari beach. Even though the region does not have many residences, the great movement reached in high season makes more water exploitation through wells, which may facilitate the entry of salt water into the water table, making studies for the management of become necessary. To begin to understand the region's demand and to identify a possible plume of contamination, the geophysical methods of Electrical Resistivity Tomography with the electric walking technique and the GPR method (Ground Penetration Radar) were used which, through the physical properties of the rocks, show the influence of porosity, saturation in water, content of salts and clay in the resistivity of rocks. The measurements should be made during drought season and remade in the same way in another high rainy season to be aware of the influence of drainage on the aquifer supply. However, for this first part of the work, it was only possible to carry out the drought surveys due to the climatic instability last summer. Although the resolution of the 100 MHz center frequency antenna signal is low in shallow areas and the signal compromised after passing through the more conductive region of water, the GPR was able to demarcate the depth of the water table. On the other

hand, the Electrical Resistivity Tomography method, with 28 and 52 electrodes and spacing of 5 meters, had a longer range than GPR and managed to discriminate more resistive regions from the more conductive ones. Thus, both methods were satisfactory in the objective of this first part, which was to find and demarcate these changes between reflectors and, especially, between soil and water bodies, such as the water table, having an analogy in most of the data.

### Introdução

Águas subterrâneas são essenciais para manter a umidade do solo e também influenciam o fluxo de rios e lagos, além de representar uma importante reserva para abastecimento populacional. Porém, pode haver nelas contaminações por diferentes substâncias e os métodos geofísicos são muito utilizados para identificar essas plumas de contaminação. Nas zonas costeiras como a de Grumari no estado do Rio de Janeiro, um dos problemas que podem ser enfrentados comprometendo a qualidade de águas para usos domésticos no preparo de alimentação e para usos domésticos em geral é o de intrusão salina em aquíferos causando a contaminação por salinidade. A alta exploração de aquíferos costeiros em regiões mais urbanizadas agrava esse avanço da cunha salina para o continente.

A intrusão salina ocorre quando a cunha da água salgada do mar avança e se mistura com as águas doces continentais do aquífero. A denominação "cunha salina" se deve pelo fato de que o encontro destas águas, com a massa de água salgada avançando para o interior indo de encontro à água doce, acarreta numa feição em forma de cunha (Figura 1). O mecanismo de interação marinha acontece porque, primeiramente, existe um gradiente hidráulico ( $\nabla$ ) na área de estudo, que promove um fluxo de água doce para o oceano, mantendo a cunha salina em equilíbrio. A água doce é menos densa que a água salgada, porém ambas misturam-se, havendo entre elas uma zona de transição ou zona de mistura, condicionada pela dispersão hidrodinâmica (Feitosa et. al., 2008). O comportamento de bombeamentos excessivos e de retirada de água subterrânea doce continental gera um desequilíbrio nessa zona de mistura e interface estacionária, ocorrendo o avanço da cunha. Ainda segundo Feitosa et. al. (2008) A declividade da superfície das águas subterrâneas aumenta na direção do oceano

porque a seção de aquífero disponível para o fluxo vai sendo reduzida pela presença da interface e, por isso, a descarga específica (velocidade de Darcy) tangente à interface, aumenta.

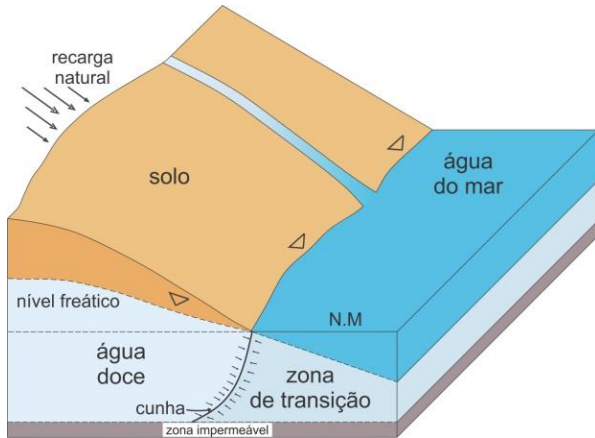


Figura 1: esquema ilustrativo de cunha salina em aquífero livre (Modificado de: Braga, 1997).

A área de estudo está localizada em Grumari (Figura 2), na porção sul da Unidade Geomorfológica do Maciço da Pedra Branca (MPB), que atua como zona dispersora de água entre as baixadas de Sepetiba e Jacarepaguá, sendo separado do Maciço de Gericinó pela Baixada Bangu – Realengo e do Maciço da Tijuca pela baixada de Jacarepaguá. Situada na Região Hidrográfica V – Baía de Guanabara e na Bacia de Jacarepaguá, essa última considerando um contexto municipal, a sub-bacia de Grumari abrange a área do PNM de Grumari e um pequeno trecho da parte sudoeste do PNM da Prainha.

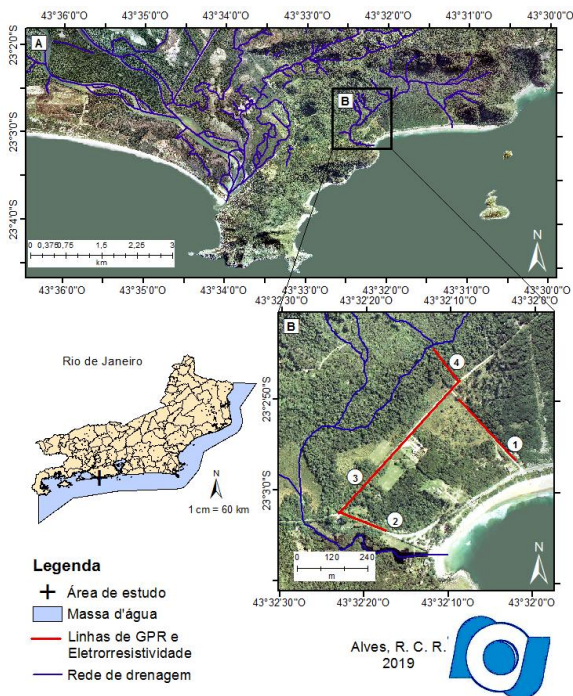


Figura 2: mapa de localização A) foto aérea e rede de drenagem

sendo a imagem B) um zoom da região de estudo de Grumari com as linhas de GPR e eletrorresistividade realizadas demarcadas e numeradas.

A restinga de Grumari, localizada no bairro de Grumari na vertente leste do Maciço da Pedra Branca, é considerada por pesquisadores uma das mais representativas e bem preservada em todo o Município do Rio de Janeiro, abrigando algumas espécies ameaçadas de extinção (PCRJ, 2000). No entanto, mesmo sendo uma região com registros antropogênicos bem menos intensificados como no restante da cidade, com o passar dos anos o bairro de Grumari vem presenciando um aumento populacional. Esse comportamento interfere na retirada de água do aquífero de Piranema, que abrange a área do bairro de Grumari, aumentando a necessidade de abastecimento hídrico.

O maciço da Pedra Branca é um maciço zonado, com zonamento inverso, centrípeto com composição granodiorítica no centro e granítica nas bordas (Penha, 1984; Penha e Wiedemann, 1984; Junho, 1991). Há também inúmeros diques de rochas básicas dispersos pelo maciço e as fraturas extensionais têm papel central na definição da rede de canais fluviais. No que diz respeito aos solos, a composição é, em sua maior parte, argissolos como categoria PVAe5, podendo conter também espodossolo e, em menor parte, neossolos flúvicos (Detzel Consulting, 2011).

Levando em consideração as informações anteriores, ao estudo compete identificar se há a presença do avanço de cunha salina no aquífero de Piranema que abrange a área do bairro de Grumari, na zona Oeste do município do Rio de Janeiro. No inverno, onde o regime de chuvas é menor, a intenção é ver qual é influência da água do mar no lençol freático em relação à salinidade em uma época considerada mais estável climaticamente. Já no verão, com alta pluviosidade e mais intensa retirada de água devido ao turismo, é preciso notar o efeito e influência da drenagem na água subterrânea. A partir destes efeitos, será possível, em outros estudos, fazer o controle de intrusão a partir de cálculos de vazão e bombeamentos, viabilizando um gerenciamento de retirada da água doce na região. Para esse estudo e análise serão utilizados os métodos de Tomografia Elétrica de Resistividade e GPR, os quais são métodos indiretos, não invasivos, de investigação de subsuperfície. As denominações para os métodos geofísicos como sendo indiretos e não invasivos se devem ao fato de não haver nenhum tipo de desmatamento, ou corte de vegetação, ou furo no solo, suas medidas não causam danos aos humanos, animais e ao meio ambiente. Os levantamentos geofísicos, embora algumas vezes passíveis de grandes ambiguidades ou incertezas na interpretação, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações distribuídas em área da geologia em subsuperfície (Kearey e Hill, 2002). De forma geral, os métodos de Eletrorresistividade e GPR são métodos geofísicos de fontes artificiais e eles investigam a

subsuperfície a partir da transmissão e recepção de ondas numa interface geológica, sendo os seus dados digitalizados.

O bairro de Grumari é um dos menos povoados do município. No entanto, suas análises hidrogeológica e hidrogeofísica podem servir como modelo para comparação para outras regiões costeiras do estado com densidade populacional muito maior como, por exemplo, a Praia do Foguete em Cabo Frio, RJ, que será a próxima praia para continuar o estudo sobre intrusões salinas pelo departamento de Geofísica do Observatório Nacional.

## Métodos

A aquisição das medidas de tomografia de resistividade elétrica consiste de um sistema de quatro eletrodos, sendo dois deles (eletrodos A e B) usados para enviar uma corrente elétrica ao solo e os outros dois (eletrodos M e N) usados para medir a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre eles. Foi utilizado o resistivímetro multicanal SuperSting R8 da AGI™ com 8 canais. Um sistema com 8 canais mede diferenças entre eletrodos MN1, MN2, ..., MN8 para uma mesma operação de injeção de corrente em um par de eletrodos AB. Dessa forma, um levantamento com 8 canais diminui o tempo de aquisição de dados. Os multi-eletrodos são fabricados com material condutivo, como aço inox, sendo fixados no solo até que haja uma boa resistência de contato e são conectados a uma caixa comutadora, denominada switch Box, por meio de cabos multicanais. A switch box seleciona os eletrodos A, B, M e N que serão utilizados para uma medida em particular direcionando a corrente e a leitura de potencial para os eletrodos corretos (Abreu, 2012). O método de elerorresistividade possui várias configurações possíveis de eletrodos a partir das técnicas básicas de sondagem elétrica ou caminhamento elétrico, conferindo grande versatilidade a essa metodologia geofísica. No presente estudo, foi empregada a técnica de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo, o qual consiste em manter um espaçamento "a" fixo entre os dois eletrodos de corrente e potencial durante todo o levantamento. Para garantir uma baixa razão sinal/ruído, os eletrodos são distribuídos ao longo de linha, dispostos externamente entre si. A partir de então, na switch box são inseridos os devidos parâmetros a fim de proporcionar a realização correta do arranjo para iniciar uma série de medidas para o caminhamento elétrico e, em cada uma dessas medidas, os dipolos são deslocados de uma distância "a" e os dados são obtidos nas profundidades  $n=1,2,3,\dots$ , gerando uma seção de distribuição de pontos de resistividade aparente. De forma geral, quanto maior for esta distância "a", maiores profundidades poderão ser alcançadas dependendo, no entanto, da presença de ruídos no local. O modelo geoeletrico foi obtido a partir da inversão 2D dos dados realizada pelo software EarthImager 2D.

O método GPR produz um curto pulso eletromagnético de alta frequência, da ordem de MHz a GHz, através do

solo. Neste estudo, o GPR foi empregado pelo uso de duas antenas não blindadas, uma funcionando como transmissora do pulso eletromagnético e outra como receptora, sendo esse par com frequência de 100 MHz e com espaçamento entre as antenas de 1 m. A aquisição de dados GPR realizada foi no modo contínuo, o qual mantém a distância entre as antenas fixa ao longo de um deslocamento retilíneo rente ao solo, sendo todo o equipamento arrastado de forma manual, também sem interferir na integridade do solo e outros meios de vida. O sistema GPR empregado nesse estudo, incluindo o monitor XV, bem como as antenas não blindadas, são da MALÁ®, assim como o software RadExplorer®, utilizado para o processamento dos dados. Para o cálculo de velocidades, foi utilizada a técnica de ajuste hiperbólico das difrações que foi utilizada para fazer a correção de tempo em profundidade.

A topografia da linha 4 foi realizada pelo receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Trimble R8s, sendo a base instalada na sede do Parque Natural Municipal de Grumari, com a autorização do gestor do parque Eduardo. O mapa de localização foi realizado no programa de sistemas de informações geográficas ArcGIS™ e ortofotos disponibilizadas pelo banco de imagens ortorectificadas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). As ilustrações foram realizadas no software Inkscape®.

## Resultados

Ainda não foi possível a realização dos levantamentos após um período de chuvas devido a não estabilização climática. Desta forma, serão apresentados os resultados dos levantamentos pós estiagem realizados no último dia do mês de agosto e no final do mês de setembro de 2018. Foram realizadas um total de 4 linhas de GPR e 4 linhas de ERT, conforme mostrou a figura 1. É importante elucidar que o solo estava muito seco, principalmente nas linhas 2 e 3, dificultando uma boa resistência de contato dos eletrodos.

A legenda à direita nas inversões de ERT (Figuras 3, 5, 7 e 9) são no modelo crescente de resistividade, com cores mais quentes para maiores valores de resistividades. A partir dos valores de resistividade de diferentes materiais encontrados em Telford et. al. (1990) e em Braga (1997), para a linha 1 a interpretação do perfil de inversão (Figura 3) mostra uma região mais resistiva nas cores mais quentes na legenda à direita, indicando a porção do solo arenoargiloso. A interface entre esta porção e a parte mais condutiva de verde e azul, pode demonstrar o nível freático, sendo esse demarcado pela linha preta pontilhada, porém há uma falta de bons dados a partir da profundidade de 15 metros em quase metade da linha e os dados ruins foram retirados.

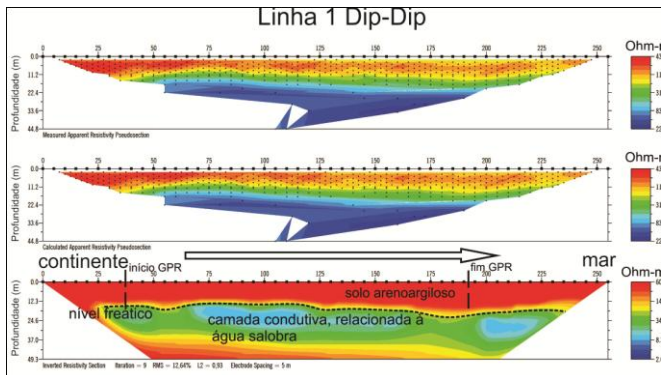


Figura 3: Seção de Inversão ERT da Linha 1 feito com arranjo dipolo-dipolo interpretado.

No perfil GPR (Figura 4), foi possível marcar o nível do lençol freático, que não foi muito satisfatório comparado ao nível no perfil ERT.

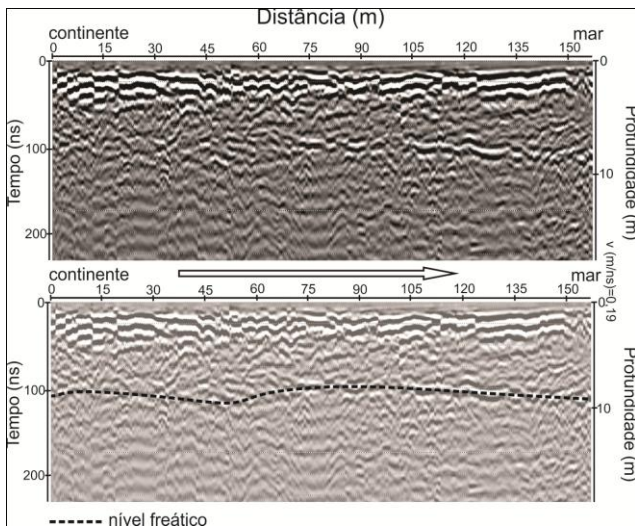


Figura 4: Perfil GPR da Linha 1 sem topografia processado nas imagens superior e inferior e interpretado na imagem inferior. A linha pontilhada demarca o nível do lençol freático.

Na linha 2 (Figura 5), realizada perpendicular à costa como a linha 1, foi possível ver uma clara separação entre o solo arenoargiloso e uma parte mais condutiva, marcada como o nível freático na interpretação do perfil de eletrorresistividade. Além disso, é válido considerar a região de cor azul mais escuro, em que é bem destacada em relação aos azuis mais claros ao ciano. Foi interpretado que essa porção mais escura seria de água salobra, porém, como não foram medidas as condutividades das águas, não é possível, ainda, discriminar com maior certeza a água doce da água salobra.

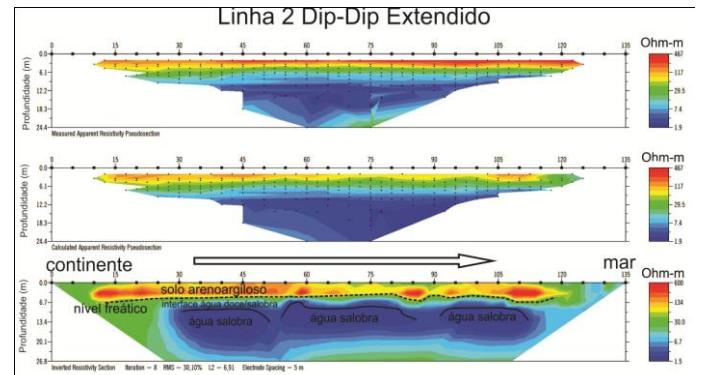


Figura 5: Seção de Inversão ERT da Linha 2 feito com arranjo dipolo-dipolo, da forma estendida, interpretado.

No radargrama interpretado da linha 2 (Figura 6), não é possível ver com nitidez o lençol freático, porém foi destacado um desalinhamento de camadas por linhas brancas contínuas, indicando um possível falhamento, mas não foi visualizada esta falha na inversão do método ERT.

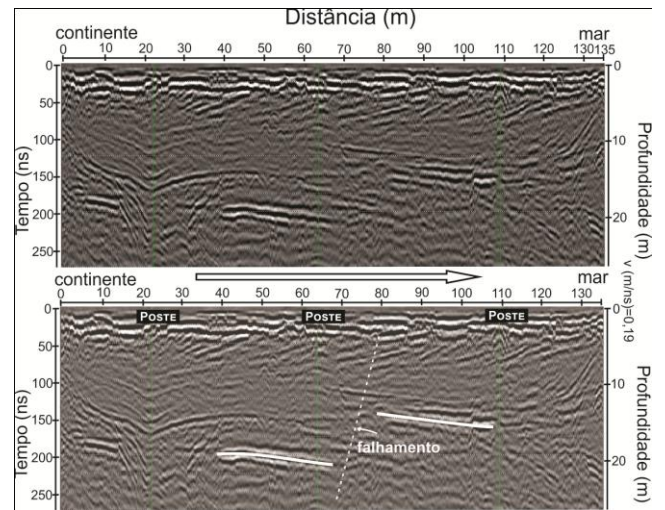


Figura 6: Perfil GPR da Linha 2 sem topografia processado nas imagens superior e inferior e interpretado na imagem inferior.

Na inversão da linha 3 (Figura 7), em *strike*, o nível freático é demarcado, mostrando uma boa correlação com a interpretação do radargrama quanto à profundidade encontrada (Figura 8). O método de eletrorresistividade também mostrou a região menos resistiva, logo mais condutiva, onde é considerada como toda a porção de água em subsuperfície, em azul mais escuro e outras regiões em verde e ciano consideradas como solo mais úmido.

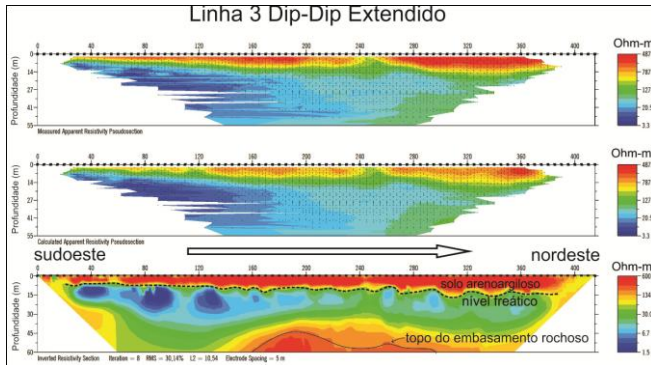


Figura 7: Seção de Inversão ERT da Linha 3 feito com arranjo dipolo-dipolo, da forma estendida, interpretado.

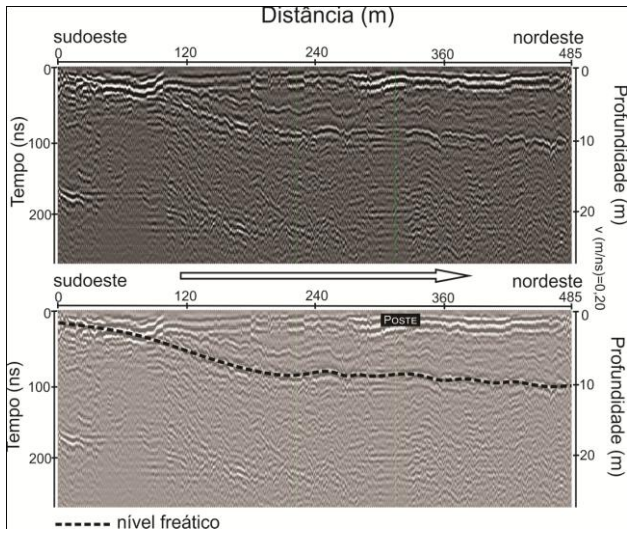


Figura 8: Perfil GPR da Linha 3 processado sem topografia nas imagens superior e inferior e interpretado na imagem inferior. A linha pontilhada demarca o nível do lençol freático.

Devido ao tempo, somente foi realizada a topografia da linha 4 por enquanto, sendo escolhida por ser a mais acidentada, comparada às outras que são mais retilíneas. A interpretação da linha 4, possibilitou também a definição do nível freático no GPR (Figura 10) e na eletrorresistividade, bem como uma possível determinação do topo rochoso no perfil de inversão ERT (Figura 9).

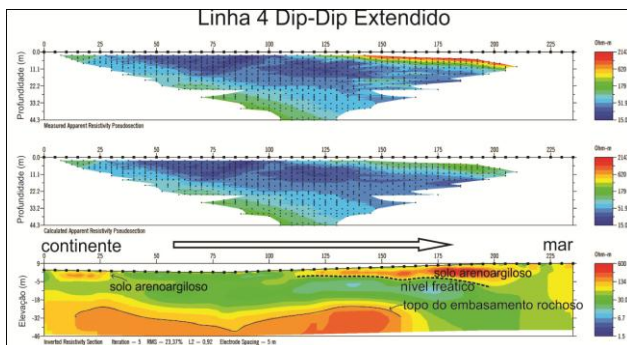


Figura 9: Seção de Inversão ERT da Linha 4 feito com arranjo dipolo-dipolo, da forma estendida, interpretado.

No deslocamento da linha 4, é válido considerar que haviam 4 alguns postes, produzindo algumas hipérbolas no radargrama e, além disso, na porção mais próxima ao continente, havia um canal, onde possivelmente o lençol freático estava aflorando (Figura 11).

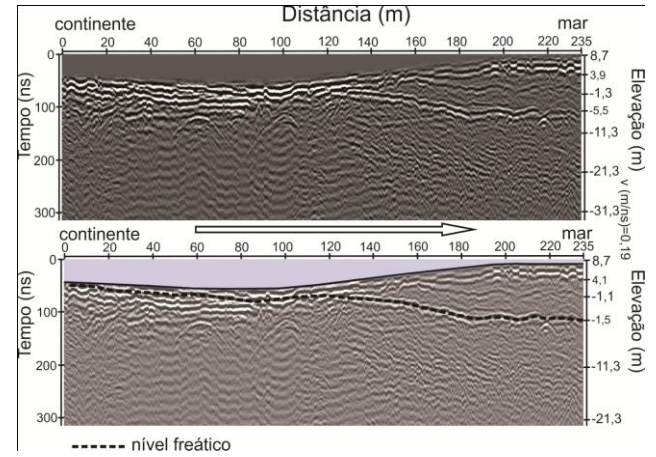


Figura 10: Perfil GPR da Linha 4 processado com a topografia nas imagens superior e inferior e interpretado na imagem inferior. A linha pontilhada demarca o nível do lençol freático.



Figura 11: Foto registrada da linha 4, mostrando o equipamento de GNSS Trimble R8s, utilizado para a realização da topografia e da localização de pontos ao deslocar do perfil.

### Conclusões

A partir dos dados obtidos nesta primeira fase do estudo, os métodos geofísicos utilizados se mostraram satisfatórios. Eles conseguiram demarcar a profundidade do lençol freático em período mais seco servindo como base para os resultados da segunda fase a ser realizada. O método de tomografia de resistividade elétrica também pôde identificar um possível topo do embasamento rochoso. No entanto, não foi identificada intrusão salina ainda na região. Portanto, a segunda fase será realizada, com os devidos levantamentos nas mesmas localidades dos dados da primeira fase para então chegar à

conclusão se há ou não a ocorrência de intrusão salina e o grau de avanço da cunha.

### Referências

Abreu, E. L. (2012) Potencialidade de configurações poço-superfície para o imageamento elétrico de áreas contaminadas, Dissertação de mestrado, Depto. de Geofísica, Inst. de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP), São Paulo – SP.

Detzel Consulting, 2011. Plano de Manejo do Parque Natural Municipal da Prainha. Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura do Rio de Janeiro– SMAC

Feitosa, F. A. C. et al. Hidrogeologia conceitos e aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID-UFPE, 2008. 812 p.

Junho, M. C. R., (1991). Contribuição à Petrologia do maciços graníticos da Pedra Branca, Frades e Nova Friburgo, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 198p. (Tese de Doutorado). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro

Kearey, Philip; Brooks, Michael; Hill, Ian. Geofísica de exploração. Oficina de textos, 2009.

PCRJ – Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Mapeamento e Caracterização do Uso das Terras e Cobertura Vegetal no Município do Rio de Janeiro entre os anos de 1984 e 1999. Rio de Janeiro: PCRJ - Secretaria Municipal de Meio Ambiente, 2000.

Penha, KM.; Wiedemann, C.M (1984) Granitóides da região central do Estado do Rio de Janeiro. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33., Rio de Janeiro, 1984. Roteiro de Enunções. Rio de Janeiro, SBG. p.5433-5456.

Penha, H.M., 1984. Geologia do Maciço da Pedra Branca, Rio de Janeiro, RJ. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 53, n. 3, p. 355.

Telford, W.M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R.E. (1990). Applied Geophysics. Second Edition. Cambridge University.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundep e ao CIEE pela manutenção de bolsas de pesquisador e estágio, respectivamente. Ao Observatório Nacional, pela disponibilidade dos equipamentos de campo e das licenças dos softwares utilizados neste estudo.