



## Modelagem geoeétrica de sistemas cársticos epigenéticos naturalmente fraturados

Lucas Miguel Gomes Nunes<sup>1,2</sup>, Carlos César Nascimento da Silva<sup>1,3</sup> (<sup>1</sup> UFRN/Departamento de Geofísica, <sup>2</sup> Bolsista PRH22, <sup>3</sup> Professor Orientador)

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<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

The karsts systems are characterized by the existence of cavities which develop from processes of chemical dissolution (predominantly in carbonate rocks) as a result of water flow, normally being conditioned to the network of pre-existing fractures in rocks. Besides the great economic and hydrogeological interest, the karsts systems are associated with a number of geotechnical problems, which can result in serious environmental impacts. To approach this problem, geophysical methods have proven quite useful in the identification and evaluation of the shapes and dimensions of karst features. The presence of these structures represent high resistivity or conductivity anomalies (depending on the presence or not of water), which can be observed in pseudo-section resistivity. Synthetic geoelectrical models were generated through the program of forward modeling Res2DMod representing real geological models. Each model presented several modifications, thus obtaining different geophysical response associated with different electrodes arrays.

From the results obtained by modeling, were identified two distinct geoelectric behavior: one more resistive, without the influence of the water table (responses geophysical well-defined vertical and horizontal), and the other one more conductive, affected by water level (geophysical response predominantly sub-horizontalized). In the case of models presenting anomalies of conductivity, there was a high conductivity zone below the water table, masking geophysical response cavities filled with water, thus interfering with the definition of the real lateral position of the discontinuities, particularly for levels of research deeper.

### Introduction

Os sistemas cársticos se desenvolvem predominantemente em regiões de rochas carbonáticas comumente fissuradas, caracterizadas pela existência de cavidades geradas por processos de dissolução química, como consequência da ação das águas subterrâneas. Ao longo destas cavidades, o fluxo de água normalmente encontra-se condicionado à rede de fraturamentos e

outras discontinuidades geológicas pré-existentes na rocha. Esta trama estrutural é resultado da evolução tectônica da região analisada ao longo do tempo geológico, envolvendo, por vezes, distintos campos de tensões, variando desde tempos pretéritos a eventos neotectônicos. Durante o processo de carstificação há uma busca por um equilíbrio químico natural que tenta ser estabelecido entre a água e as rochas carbonáticas, que resulta em transformações que distinguem o meio cárstico-fissural dos demais meios aquíferos, como por exemplo, a presença de paisagens caracterizadas por dolinas, uvalas, sumidouros, cavernas, dentre outros (Silva, 2008).

O desenvolvimento do carste passa por diferentes estágios evolutivos. Dá-se início a partir do desenvolvimento da permeabilidade secundária de rochas carbonáticas, através da dissolução por ação da água percolante ao longo das discontinuidades pré-existentes (normalmente fraturas), ocasionando o surgimento de canais de drenagem subterrânea, e a implantação de uma paisagem fluviocárstica. Posteriormente, com o aumento da drenagem subterrânea e das rotas preferenciais de percolação, ocorre uma ampliação das dolinas de dissolução e as paisagens fluviocársticas, de uma forma gradual, transformam-se em depressões compostas (drenagem interna bem desenvolvida, múltiplos sumidouros e superfície interna ondulada). Por sua vez, tais depressões evoluem gerando novos pontos de infiltração preferenciais (sumidouros), rebaixam os fundos das dolinas pré-existentes, modificando assim a topografia da região, até atingir a morfologia predominante em rochas carbonáticas (depressões simples e compostas). Assim, são encontradas as formas cársticas mais comuns nos sistemas cársticos epigenéticos (modificado de Silva, 2008).

Neste contexto, áreas que apresentem uma geologia caracterizada por feições cársticas são de grande interesse econômico (bons solos para agricultura) e hidrogeológico (reservatórios de águas subterrâneas). Do ponto de vista geoambiental, tais áreas estão associadas a uma série de problemas geotécnicos que podem causar danos a estruturas, edificações, poços, tanques de resíduos (em áreas de exploração de hidrocarbonetos) e consequentemente resultar em sérios impactos ambientais (Figura 1).

O desenvolvimento de modelos geoeletricos a partir da integração de dados geofísicos e geológicos tem se tornado cada vez mais importante no auxílio à interpretação da geologia em subsuperfície. Com o objetivo de simular da forma mais fiel possível as condições reais de campo, foi utilizado o software de modelagem direta Res2DMod (programa que calcula a

resistividade aparente de pseudo-seções para determinados arranjos e modelos bidimensionais), desenvolvido por Loke (2002).

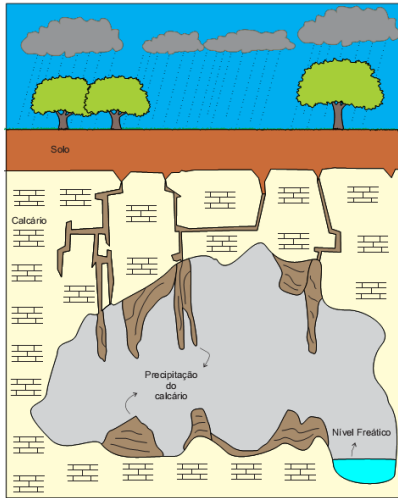


Figura 1 – Simulação de um sistema cárstico epigenético naturalmente fraturado, apresentando cavidades geradas por processos de dissolução química.

Para abordar este tipo de problema, a aplicação de métodos geofísicos para a interpretação geofísico-geológica de relevos e feições cársticas, tem se mostrado bastante útil na identificação e avaliação de suas formas e dimensões, (Silva Junior, 2006). Nesse contexto, pela razão custo/benefício no que diz respeito à profundidade de investigação e resolução, o método da eletrorresistividade tem sido amplamente utilizado na identificação de certas feições cársticas.

**Método Geoelétrico**

O método geofísico da eletrorresistividade baseia-se na determinação da resistividade aparente do substrato a partir da resposta ao fluxo de uma corrente elétrica (Ward, 1990). O princípio básico do método consiste na aplicação de uma corrente elétrica artificial, contínua ou alternada, no solo por meio de um eletrodo localizado na superfície, com o objetivo de medir o potencial elétrico gerado nas proximidades do fluxo de corrente (usando um equipamento conhecido como eletrorresistímetro). Utilizando um par de eletrodos de corrente (A-B) e um par de eletrodos de potencial (M-N), representadas na figura 2, pode-se obter a diferença de potencial gerada, sendo possível associa-la à resistividade elétrica das rochas em subsuperfície e, posteriormente relacionar com variações litológicas, fraturamentos, saturação e contaminação dos solos.

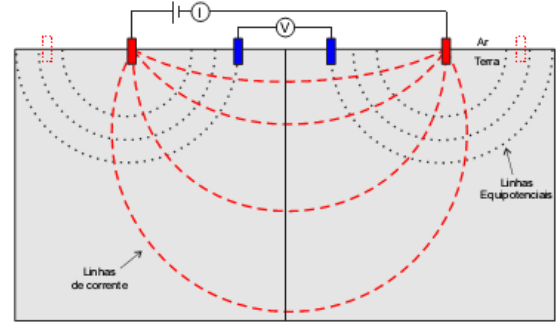


Figura 2 – Representação do método da eletrorresistividade.

Partindo do princípio da *Lei de Ohm*, conhecendo-se a intensidade da corrente elétrica (*i*) utilizada, a diferença de potencial medida ( $\Delta v$ ) e a geometria de distribuição dos eletrodos (*k*), é possível calcular a resistividade do semi-espaço em subsuperfície, por meio da equação 1:

$$\rho = k \cdot \Delta v / i \text{ (equação 1)}$$

Na modelagem geoelétrica foi utilizada a técnica do Imageamento Elétrico (IE). Esta técnica consiste na análise de um parâmetro físico (no caso a resistividade), o qual é obtido a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando sua variação na horizontal, ao longo de um perfil, a uma ou mais profundidades determinadas. Na técnica IE, o procedimento adotado consiste em deslocar constantemente o arranjo de eletrodos, e medir a diferença de potencial entre os eletrodos gerados pela passagem da corrente elétrica. Como resultado final, temos uma seção geoelétrica mostrando as variações laterais e verticais das resistividades aparente das camadas.

**Modelagem**

Há diversos softwares de modelagem geoelétrica disponíveis. Dentre estes, o Res2DMod é um programa de modelagem direta que calcula pseudo-seções de resistividade aparente simulando o uso da técnica de Imageamento Elétrico para modelos bidimensionais e determinados arranjos (definidos pelo usuário), utilizando métodos matemáticos de diferenças finitas e elementos finitos.

Com o objetivo de simular a variação de resistividade elétrica bidimensional nas rochas, foram feitas modelagens utilizando o software Res2DMod, obtendo-se dados sintéticos para uma posterior correlação com dados reais em um trabalho futuro. Foi realizada a análise de diversos modelos sintéticos (partindo de modelos com uma geologia mais simples até modelos considerados mais complexos), a partir de diferentes arranjos de eletrodos obtendo-se diferentes respostas, que podem representar modelos geológicos reais. Cada modelo apresentou modificações simulando descontinuidades verticais e horizontais no calcário (com valores de resistividade distintos), além de diferentes níveis de saturação de água e graus de conectividade.

Inicialmente, a modelagem simulou uma geologia mais simples, com a finalidade tanto de interpretar e compreender de forma mais clara as respostas geofísicas

obtidas de cada arranjo, como facilitar o entendimento dos procedimentos relacionados ao software Res2DMod. Posteriormente, foram utilizados modelos geológicos mais complexos buscando simular de forma mais aproximada possível às condições reais de campo. Em todos os modelos foram utilizados 60 eletrodos com espaçamento dos eletrodos “a” igual a 5m. O número de eletrodos foi mantido em todos os arranjos visando respostas geofísicas relacionadas apenas a heterogeneidade do meio geológico, não sendo influenciada por uma possível variação da parametrização da aquisição.

O resultado da primeira modelagem (Figura 3) utilizando diferentes arranjos de eletrodos (Schlumberger, Dipolo-Dipolo e Wenner) partiu de um modelo considerando:

- duas camadas plano-horizontais
- uma cavidade vertical (resistiva)

A camada superior simulou uma cobertura sedimentar de resistividade de 300Ohm.m, enquanto que a camada inferior estava associada à uma rocha carbonática (calcário) de resistividade 1000Ohm.m. Por fim, a cavidade vertical simulou uma fratura (com abertura) cortando discordantemente o calcário, não saturada por água e preenchida por ar, apresentando-se com resistividade de 4000Ohm.m.

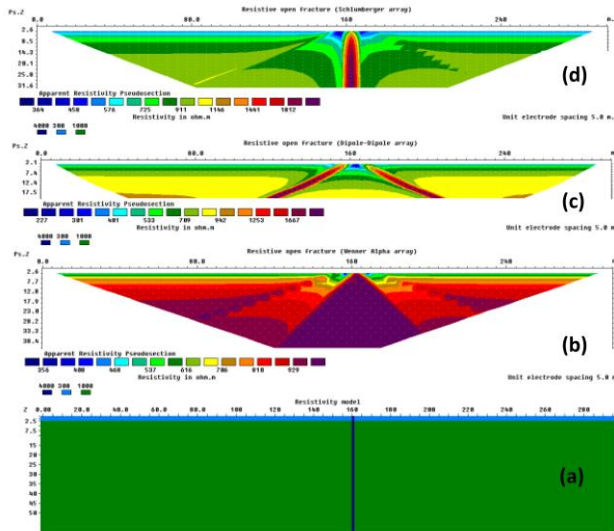


Figura 3 – (a) Modelo geológico sintético com fratura verticalizada preenchida por ar; respostas geofísicas do modelo em (a) para os arranjos Wenner (b), dipolo-dipolo (c) e Schlumberger (d).

A segunda modelagem (Figura 4) considerada foi similar ao modelo anterior, diferindo apenas no valor de resistividade da cavidade vertical:

- duas camadas plano-horizontais
- uma cavidade vertical (condutiva)

Nesse caso, a cavidade vertical simulou uma fratura aberta discordante ao calcário, saturada em água, o que gerou a anomalia condutiva de 20Ohm.m.

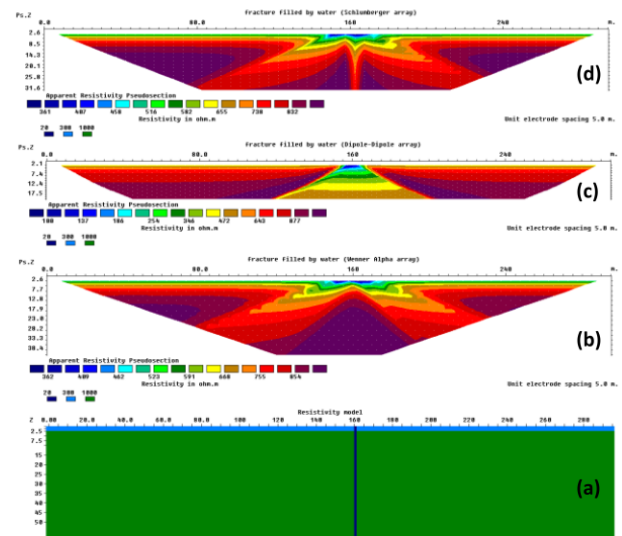


Figura 4 – (a) Modelo geológico sintético com fratura verticalizada saturada em água; respostas geofísicas do modelo em (a) para os arranjos Wenner (b), dipolo-dipolo (c) e Schlumberger (d).

A partir da terceira modelagem, foram obtidos resultados partindo de modelos mais complexos. A modelagem considerou:

- duas camadas plano-horizontais
- duas cavidades horizontais (resistivas)
- quatro cavidades verticais paralelas (resistivas)

Das camadas plano-horizontais citadas, a primeira representou uma camada superficial de resistividade 700Ohm.m e a outra representou o calcário com resistividade 1000Ohm.m. As duas cavidades horizontais simularam o acamamento de rochas carbonáticas atuando como zonas de dissolução de elevada resistividade, distanciadas 10m uma da outra verticalmente. As quatro cavidades verticais paralelas simularam fraturas verticais distanciadas 10m entre si, conectando as duas cavidades horizontais em subsuperfície. Neste caso, foram consideradas fraturas verticais paralelas não preenchidas por qualquer tipo de sedimento ou saturada em água, apresentando assim anomalias resistivas, 5000Ohm.m. A figura 5 apresenta as respostas geofísicas dos três arranjos utilizados.

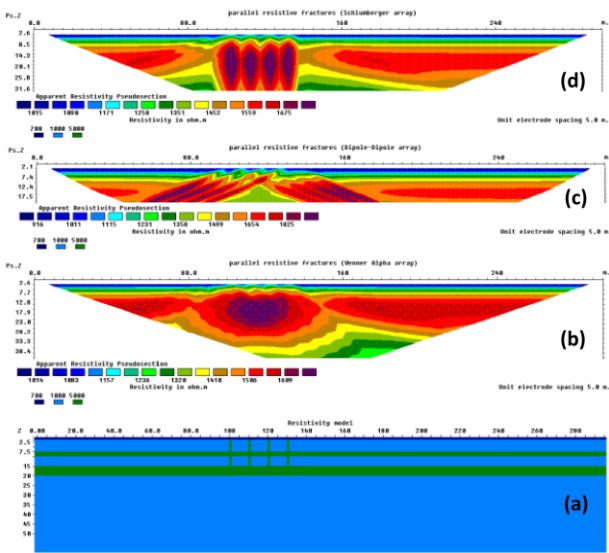


Figura 5 – (a) Modelo geológico sintético com camadas plano-horizontais, além de cavidades horizontais e verticais de elevada resistividade; respostas geolétricas do modelo em (a) para os arranjos Wenner (b), dipolo-dipolo (c) e Schlumberger (d).

O resultado da quarta modelagem (figura 6) partiu de um modelo similar ao anterior, diferindo apenas nas cavidades horizontal e vertical inferiores:

- duas camadas plano-horizontais
- cavidade horizontal superior (resistiva)
- cavidade horizontal inferior (condutiva)
- cavidade vertical superior (resistiva)
- cavidade vertical inferior (condutiva)

As cavidades horizontal e vertical inferiores foram modeladas com baixa resistividade (30Ohm.m) simulando fraturas saturadas em água.

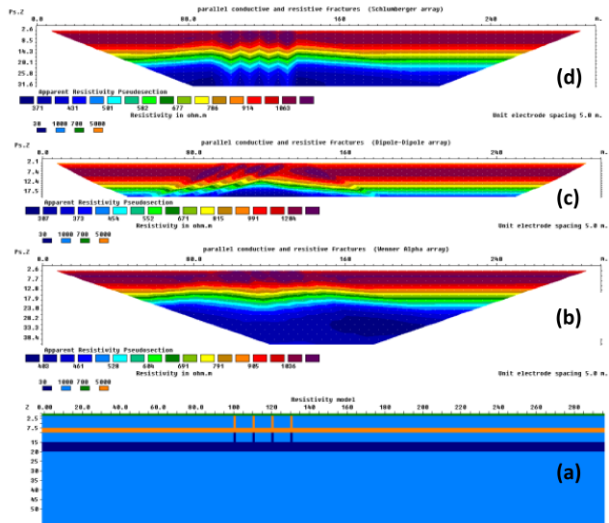


Figura 6 – (a) Modelo geológico sintético com camadas plano-horizontais, além de cavidades horizontais e verticais. Apresentam comportamento geolétrico condutivo nas camadas inferiores (simulando nível freático a 10m de profundidade) e resistivo nas mais rasas (acima do nível freático); respostas geolétricas do modelo em (a) para os arranjos Wenner (b), dipolo-dipolo (c) e Schlumberger (d).

O resultado da quinta modelagem (Figura 7) partiu de um modelo similar à terceira, porém as cavidades verticais inferiores foram deslocadas 5m horizontalmente.

- duas camadas plano-horizontais
- duas cavidades horizontais (resistivas)
- quatro cavidades verticais superiores (resistivas)
- quatro cavidades verticais inferiores deslocadas 5m horizontalmente (resistivas)

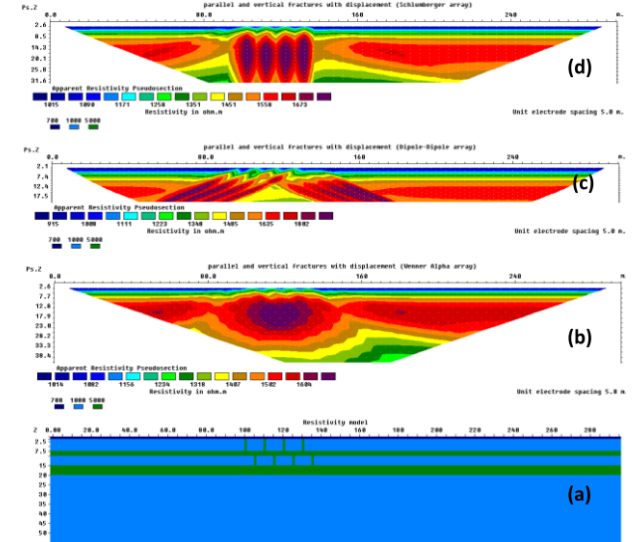


Figura 7 – (a) Modelo geológico sintético com camadas plano-horizontais, e cavidades horizontais e verticais de elevada resistividade. Há um deslocamento horizontal relativo (5m) entre as estruturas verticalizadas; respostas geolétricas do modelo em (a) para os arranjos Wenner (b), dipolo-dipolo (c) e Schlumberger (d).

O resultado obtido na sexta modelagem (Figura 8) partiu de um modelo semelhante ao da quinta modelagem:

- duas camadas plano-horizontais
- uma cavidade horizontal superior (resistiva)
- uma cavidade horizontal inferior (condutiva)
- quatro cavidades verticais superiores (resistiva)
- quatro cavidades verticais inferiores deslocadas 5m horizontalmente (condutiva)

As cavidades horizontais e verticais inferiores foram modeladas com baixa resistividade simulando fraturas saturadas em água.



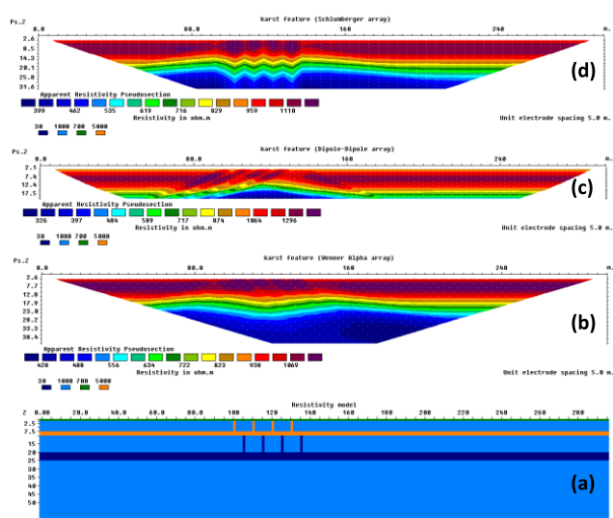


Figura 8 – (a) Modelo geológico sintético com camadas plano-horizontais, e cavidades horizontais e verticais. O nível freático encontra-se a 10m de profundidade. Há um deslocamento horizontal relativo (5m) entre as estruturas verticalizadas; respostas geoeletricas do modelo em (a) para os arranjos Wenner (b), dipolo-dipolo (c) e Schlumberger (d).

### Resultados Obtidos

Com base nos modelos geológicos utilizados, bem como nas respostas geofísicas sintéticas associadas aos arranjos empregados, observou-se que, comparativamente, o Schlumberger apresentou melhores resultados no que diz respeito ao imageamento das cavidades propostas na modelagem, ao menos analisando os modelos de maior complexidade envolvendo estruturas com diferentes atitudes e distintos comportamentos geoeletricos.

A partir dos resultados obtidos pela modelagem, foi possível identificar duas formas distintas de distribuição da resistividade aparente em subsuperfície: uma relacionada aos modelos com anomalias de resistividade (respostas geofísicas verticais e horizontais bem definidas) e uma outra relacionada aos modelos com anomalias de condutividade (respostas geofísicas predominantemente sub-horizontalizadas).

Os modelos que apresentaram anomalias de resistividade (fraturas preenchidas por ar, figuras 3, 5 e 7), geraram pseudo-seções de resistividade com respostas geofísicas satisfatórias que permitiram um bom imageamento tanto vertical quanto horizontal. As respostas obtidas pelo uso do arranjo Schlumberger se aproximaram mais do modelo geológico, associando bem a variação lateral de resistividade às cavidades resistivas. Enquanto isto, houve certa distorção quanto às respostas geoeletricas dos arranjos dipolo-dipolo (feições de dissolução verticais visualizadas com mergulho aparente) e Wenner, o qual delimitou bem as variações verticais, porém gerou distorções na geometria das fraturas verticalizadas. Estas distorções podem ser relativas a um modelo sintético não invertido, no qual não utiliza valores reais de resistividade e profundidade, e sim resistividade aparente e pseudo-profundidade, respectivamente.

Os modelos que apresentaram anomalias de condutividade (fraturas preenchidas por água, figuras 4, 6 e 8) indicaram uma zona de elevada condutividade abaixo do nível freático, mascarando a resposta geofísica das cavidades preenchidas por água e, desta forma, interferindo na definição do real posicionamento lateral das discontinuidades. Os três arranjos permitiram a visualização do contato entre as zonas saturada e insaturada. Dentre estes, o arranjo Wenner, mais sensível às variações verticais de resistividade, apresentou-se como o mais eficiente.

### Conclusões

A modelagem se mostrou de fundamental importância para a programação de levantamentos realizados previamente ao campo, definindo os arranjos de eletrodos mais adequados para diferentes tipos de estruturas (modelos geológicos mais simples ou complexos), além de toda a parametrização da aquisição (número e espaçamento de eletrodos, dentre outros). Os resultados também permitiram concluir que, de acordo com a geologia proposta e modelada, períodos nos quais o nível freático encontra-se mais próximo à superfície não seriam os mais adequados para aquisição de dados geoeletricos, ao menos quanto à análise da estrutura desde os níveis mais rasos até os mais profundos (cerca de poucas dezenas de metros). Neste caso específico, analisando uma mesma estrutura, ela apresentará dois comportamentos geoeletricos distintos: um mais resistivo, compreendendo a sua porção mais rasa, sem influência provocada pelo nível freático e um mais condutivo, relacionado à sua porção mais profunda, afetada pelo nível d'água. Em um caso desta complexidade, as anomalias resistiva e condutiva (topo e base) competem entre si, mascarando o efeito isolado. Com isto, a identificação da estrutura como um todo é comprometida, principalmente para níveis de investigação maiores.

### Considerações

No presente trabalho foi utilizada uma modelagem direta (Res2DMod), construída de forma interativa, com a finalidade de visualizar as variações de resistividade aparente em pseudo-seções bidimensionais obtidas frente aos diversos arranjos utilizados. Entretanto, convém ressaltar que tais valores de resistividade e profundidade não representam os reais valores de resistividade elétrica e profundidade das rochas em subsuperfície. Dessa maneira, considerando que o trabalho ainda está em uma fase preliminar, posteriormente serão empregados modelos de inversão, com o objetivo de ajustar os dados de resistividade para valores mais próximos dos modelos geológicos reais, trabalhando com o software Res2DInv. Dados reais serão coletados, analisando o contexto geológico-estrutural local, de forma a corroborar (ou não) com os dados modelados.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio do Programa de Formação em Geologia, Geofísica e Informática para o Setor Petróleo e Gás na UFRN (PRH22), pelo financiamento dos trabalhos, e por estar

proporcionando a bolsa de estudo ao aluno; ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Geofísica do Petróleo (INCT -GP). Agradecem também ao Departamento de Geofísica (DGef), por toda infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento do projeto e ao CNPq, pela aprovação de projeto de pesquisa (edital Universal) do Professor, o qual contribuiu para os dados apresentados.

### Referências

Loke, M.H. 2002. Res2DMod ver. 3.01. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-element methods. Wenner (alpha, beta, gamma), inline & equatorial dipole-dipole, pole-pole, pole-dipole and Wenner-Schlumberger. Austin-TX, USA. 28p.

Silva Junior, J.S. da, 2006. Aplicação dos métodos gravimétrico e eletrorresistivimétrico na interpretação geofísica de áreas localizadas no sistema aquífero cárstico em Almirante Tamandaré/PR. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná.

Silva, A.B., 2008. Hidrogeologia de Meios Cársticos. *In*: Feitosa, F.A.C. e Manoel Filho, J., (eds) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM, LABHID-UFPE, chapter 3.3, 3 ed., p. 153-174.

Ward, S.H., 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. *In*: Ward, S. H. Editora: Geotechnical and Environmental Geophysics., SEG Special Publication. Vol.I.