

UTILIZAÇÃO DA ELETRORRESISTIVIDADE NA CARACTERIZAÇÃO DE ARENITOS FRATURADOS DO GRUPO ITARARÉ – BACIA DO PARANÁ

THE USE OF RESISTIVITY METHOD IN FRACTURED SANDSTONES CHARACTERIZATION OF ITARARÉ GROUP–PARANÁ BASIN

Adriane Fátima de Campos¹
Augustinho Rigoti²
Sidnei Pires Rostirolla³
Ciro Jorge Appi⁴
Ronaldo Paulo Kraft⁵
Marcelo Kulevicz Bartoszeck⁶

RESUMO

Como contribuição a um projeto de pesquisa abrangente de modelos análogos a reservatórios fraturados (Projeto Modres), foram realizados ensaios geoeletricos nos arenitos do Grupo Itararé, Bacia do Paraná. O principal objetivo deste estudo consiste em determinar as respostas de resistividade dos arenitos fraturados do Grupo Itararé. Particularmente interessa a detecção de fraturas e seu comportamento hidráulico (atuando como barreiras ou condutos) influenciando a resistividade, e, neste contexto, apresenta uma nova contribuição ao entendimento do Grupo Itararé. A área de estudo envolve a Fazenda Rivadávia, localizada perto do Parque Estadual de Vila Velha. Geologicamente a área é formada por rochas da Formação Campo Mourão, Grupo Itararé, Bacia do Paraná, sendo representadas por uma porção sedimentar arenosa chamada informalmente de "Arenitos Lapa-Vila Velha". O levantamento de campo foi realizado sobre uma malha com quinze linhas paralelas e distanciadas 10 metros. Vários espaçamentos foram utilizados no arranjo dipolo-dipolo, incluindo

1 Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico. Caixa Postal 19027. CEP 81531-980. Curitiba - Paraná - Brasil. Fone: (41) 3361-3692. adrianefcampos@yahoo.com.br

2 Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico. Caixa Postal 19027. CEP 81531-980. Curitiba – Paraná - Brasil. Fone: (41) 3361-3692. arigoti@ufpr.br

3 Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico. Caixa Postal 19027. CEP 81531-980. Curitiba - Paraná - Brasil. Fone: (41) 3361-3022. rostirolla@ufpr.br

4 PETROBRAS/CENPES/PROFEX. Cidade Universitária – Quadra 7. CEP: 21949-900 Rio de Janeiro – RJ – Brasil. Fone: (21) 3865-6464. appi@cenpes.petrobras.com.br

5 Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica. Departamento de Geologia Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico. Caixa Postal 19027. CEP 81531-980. Curitiba - Paraná - Brasil. Fone: (41) 3361-3022. rpkraft@hotmail.com

6 Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica. Departamento de Geologia Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico. Caixa Postal 19027. CEP 81531-980. Curitiba - Paraná - Brasil. Fone: (41) 3361-3022. taipataipa@hotmail.com

5, 10, 20, 30 e 40 metros. O processamento dos dados iniciou-se com a plotagem em pseudo-seções de resistividade aparente, seguida da geração das seções modelos de resistividade através de inversão 2D. Os resultados obtidos permitem correlacionar os valores de resistividade com diversas feições geológicas, mais especificadamente com a geometria das camadas e o contato entre litologias diferentes. De maneira geral, foi observado que o condicionamento estrutural, representado pelas fraturas, influenciam os valores de resistividade. Altos de resistividade foram correlacionados a fraturas mapeadas, possivelmente indicando que estas se encontram fechadas, enquanto que baixos podem indicar fraturas mais abertas, maior porosidade e com conseqüente maior facilidade de percolação de água. Os resultados mostram valores muito altos (milhares de Ohm.m), até certo ponto distribuídos de forma uniforme, mesmo nos níveis mais arenosos, indicando que a permeabilidade dos arenitos é muito baixa.

Palavras-chave: eletrorresistividade, rochas fraturadas, Grupo Itararé.

ABSTRACT

Goelectric surveys were carried out on sandstones of Itararé Group, Paraná Basin, as a contribution to a comprehensive research project on fractured reservoirs (Modres Project). The main objective of this study to determine the resistivity of fractured rocks from Itararé Group – Paraná Basin. Particularly fractures acting as barriers or conduits influencing resistivity by differential water percolation. The study area involves the Rivadávia Farm, located close to the Vila Velha Park, formed by rocks of Campo Mourão Formation, represented by a thick portion of psamitics rocks informally called "Arenitos Lapa-Vila Velha". The field survey was carried out on a regular mesh with fifteen parallel lines, with 10 meters spacing. Several dipole-dipole electrode spacing were used, including 5, 10, 20, 30 and 40 meters. Data processing started with the apparent resistivity pseudo-sections plot, followed by of 2D inversion models. Inversion results allow to correlate the resistivity values with diverse geologic features, particularly with the layers geometry and the contact between different lithologies. It was observed that the structural conditioning, represented by fractures and faults, influences the resistivity values. Resistivity highs had been correlated with mapped faults, possibly indicating closed type of faults, while lows can indicate open ones, with higher porosity which propitiate water percolation. The results show high values (thousand of Ohm.m), somehow uniformly distributed, even in the most sandy levels, indicating very low permeability for the Itararé sandstones.

Key-words: electrical resistivity, fracture rocks, Itararé Group.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como princípio o conceito de que o estudo detalhado das respostas geofísicas para um meio fraturado em subsuperfície, em termos de parâmetros físicos como resistividade elétrica é uma importante ferramenta na modelagem geométrica de reservatórios fraturados e os resultados obtidos apresentam um maior detalhamento do que aqueles obtidos através de amostragem e mapeamento de superfície. Este trabalho integra o Projeto Modelagem de Potenciais Reservatórios Fraturados em Superfície para Auxílio Exploratório em Subssuperfície (Modres), desenvolvido pela Universidade Federal do Paraná e em parceria com a Petrobras, através do Programa Tecnológico em Fronteiras Exploratórias (Profex). Os estudos envolveram a caracterização da anisotropia estrutural em reservatórios fraturados, tendo como alvo rochas sedimentares carboníferas e permianas da Bacia do Paraná, correlatas a reservatórios de gás existentes em

subsufície, que foram afetadas por múltiplos eventos deformacionais (Appi & Rostirolla 2004).

A seleção da área onde estão sendo realizados os trabalhos, região do Parque Estadual de Vila Velha, foi definida em função de encontrar-se na faixa onde afloram rochas da borda leste da Bacia do Paraná, correspondentes ao Grupo Itararé. A área objeto desse estudo abrange a região da Fazenda Rivadávia (figura 1), que apresenta diversos afloramentos de rochas do Grupo Itararé, formando uma geomorfologia particular com escarpas e platôs de dimensões consideráveis.

O principal objetivo deste trabalho se concentra em determinar as respostas geofísicas dos arenitos fraturados do Grupo Itararé, utilizando o método de eletrorresistividade. Particularmente interessa a detecção de fraturas e seu comportamento hidráulico (atuando como barreiras ou conduitos) influenciando sua assinatura geofísica.

As atividades desenvolvidas na realização deste trabalho são mostradas na figura 2 e especificamente

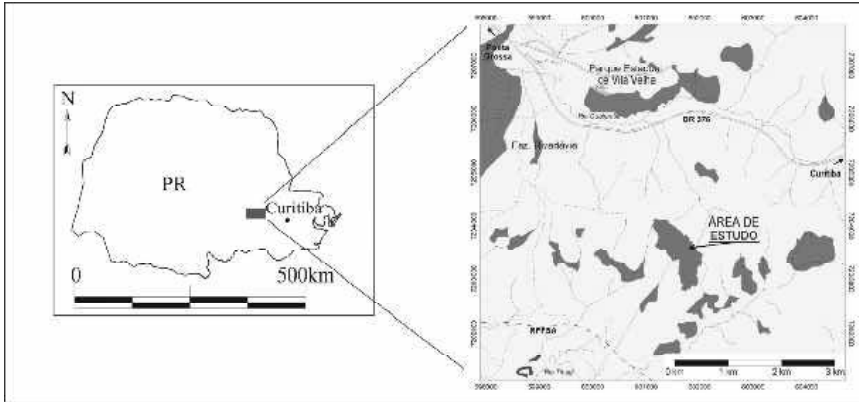


Figura 1 – Localização da área de estudo no estado do Paraná. Study area location in Paraná State.

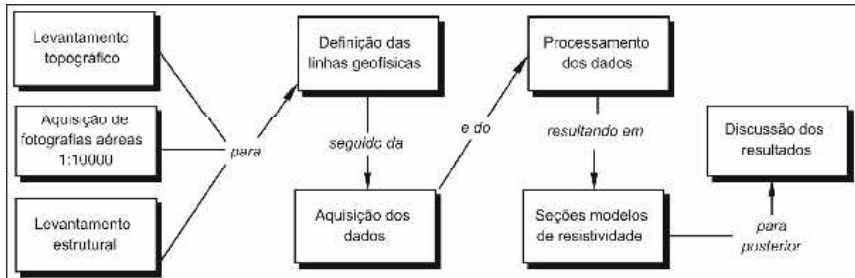


Figura 2 – Etapas desenvolvidas no decorrer das atividades. Developed activities steps.

contaram com os seguintes procedimentos: aquisição de fotografias aéreas em escala 1:10.000; mapeamento estrutural das principais estruturas rúpteis da área de estudo; definição do posicionamento das linhas geofísicas a serem levantadas; aquisição e processamento dos dados e discussão dos resultados.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica desenvolvida sobre crosta continental e preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas. Esta bacia possui uma área maior que 1.400.000km², incluindo porções situadas no Brasil, Paraguai, Argentina e norte do Uru-

guai. Segundo Zalán et al. (1990), possui um formato alongado, na direção NNE-SSW, com largura média de 900 km, sendo caracterizada por uma sedimentação paleozóica-mesozóica, com registro estratigráfico com idades entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo.

A região estudada está compreendida por uma faixa aflorante de rochas pertencentes à Formação Campo Mourão, Grupo Itararé, Bacia do Paraná, sendo representadas por uma seção sedimentar arenosa denominada informalmente de "Arenitos Lapa-Vila Velha" (França et al. 1996). Segundo França & Potter (1988), o Grupo Itararé é uma unidade glaciogênica com cerca de 1200 metros de espessura, que compreende as Formações Lagoa Azul, Campo Mourão, Taciba e Aquidauana (figura 3).

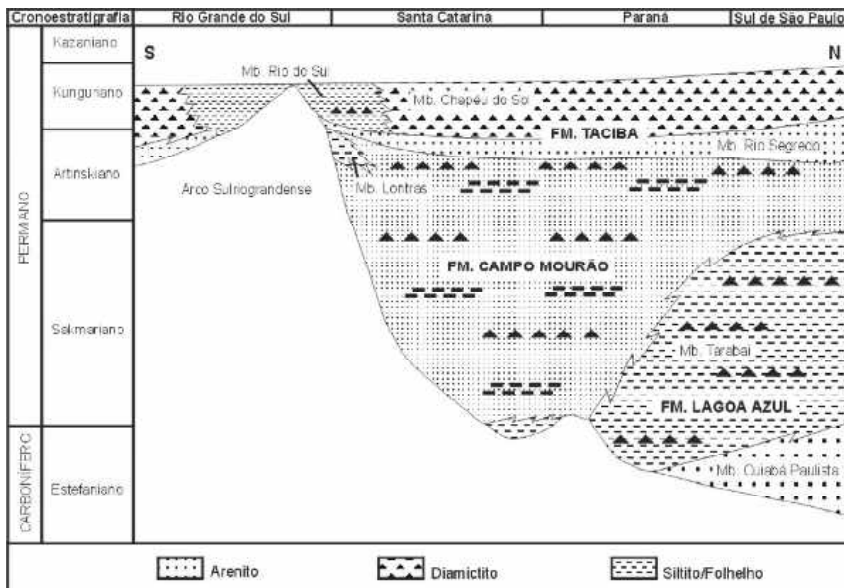


Figura 3 – Coluna cronolitoestratigráfica do Grupo Itararé segundo França & Potter 1988. Chronolitostratigraphic column of Itararé Group according França & Potter, 1988.

O Grupo Itararé é a unidade litoestratigráfica mais espessa e bem conhecida da Bacia do Paraná. Segundo Castro (1999), representa uma complexa unidade sob o ponto de vista deposicional. Isto se deve principalmente às condições glaciais que dominaram a sua deposição, proporcionando uma grande variedade de fácies e sistemas deposicionais com uma complexa distribuição vertical, lateral e temporal.

Especificadamente sobre a região próxima à área de estudo, França et al. (1996) acreditam que os Arenitos Vila Velha, aflorantes no Parque Estadual de Vila Velha, são representados por arenitos sobrepostos a ritmitos e diamictitos, na forma de platôs subhorizontais. Estes autores interpretam que tanto estes arenitos quanto os Arenitos Lapa são componentes de uma mesma seqüência deposicional, com os Arenitos Lapa representando os canais e os Arenitos Vila Velha como lobos subaquosos, depositados num ambiente glacialmente induzido.

GEOLOGIA DA ÁREA

Rostirolla et al. (2000) realizaram trabalhos na área de estudo e individualizam quatro subunidades

faciológicas da Formação Campo Mourão, denominadas informalmente de subunidades lcm1 a lcm4 (figura 4), além de afloramentos da Formação Ponta Grossa e rampas de colúvio nas áreas mais baixas do terreno. Segundo estes autores, a subunidade lcm1 compreende folhelhos e siltitos cinza-escuros, com intercalações de camadas de arenito muito fino. A subunidade lcm2, imediatamente sobreposta, é constituída de arenitos finos a médios, maciços, com constantes estruturas de fluidização, configurando fácies de lobos de suspensão e barras de desembocadura depositados por desaceleração de fluxo. A subunidade lcm3 compõe-se de lobos arenosos maciços, com forma lenticular acunhada, com muitas estruturas de amalgamação; sua interpretação é semelhante à subunidade lcm2, porém com maior densidade de fluxo e tendência a processos trativos mistos com desaceleração de fluxo; na parte superior desta subunidade, gradacionalmente ocorrem arenitos grossos a conglomerados. A subunidade lcm4 contém camadas contorcidas, depositadas em discordância sobre a unidade lcm3, em contexto de fluxos gravitacionais. Ocorrem níveis com feições de deslizamento e, sobre esses, arenitos grossos a médi-

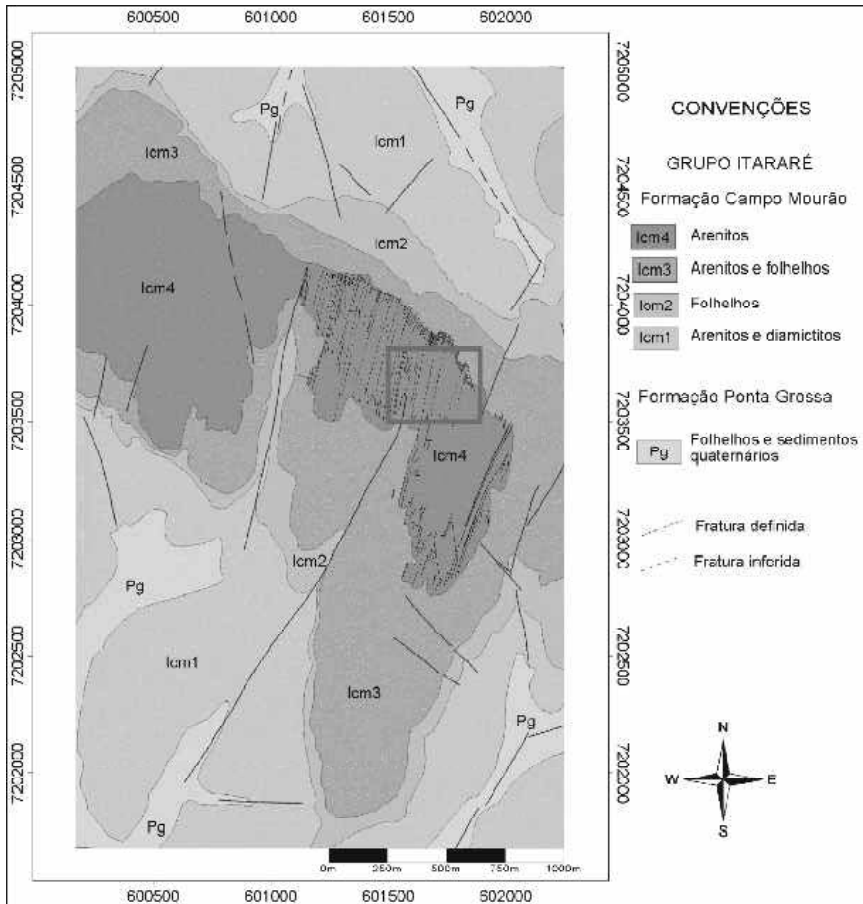


Figura 4 – Mapa geológico de detalhe da área estudada, mostrando a distribuição das unidades mapeadas. O retângulo indica os limites da área de aquisição elétrica (modificado de Rostirolla et al., 2000). *Detailed geologic map of the study area, showing the units distribution. The rectangle indicates the limits of the electrical acquisition area (modified of Rostirolla et al., 2000).*

os, com estratificação plano-paralela ou em cunha. A parte superior da subunidade lcm4 contém algumas camadas de barras sigmoidais, rítmicas, gradacionais na base e topo, tendendo à gradação inversa, marcando um novo ciclo, apenas parcialmente preservado da erosão atual.

Rostirolla et al. (2000) realizaram um levantamento estrutural de detalhe, que permitiu documentar um

arranjo sistemático de pequenas fraturas e falhas em escalas variadas. De modo geral, as camadas dispõem-se na posição subhorizontal, com leves basculamentos, gerados por rotação a partir das falhas maiores, predominando a direção N10-30E, subverticais, com uma segunda moda em N70-80W. A distribuição final configura um sistema de pequenos *grabens* e *horsts*, limitados por falhas com pequeno rejeito, da ordem de deze-

nas de centímetros a localmente poucos metros. O movimento ao longo destas falhas é quase imperceptível, localmente evidenciado por lineações e assimilado em bandas de deformação, onde ocorre uma cimentação característica por óxidos de ferro e/ou sílica.

MÉTODO GEOELÉTRICO

A eletrorresistividade é um método geoeletrico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais. Inicialmente este método teve sua aplicação restrita à prospecção mineral. Atualmente deve ser entendido como um método de amplo espectro de aplicação, podendo suas potencialidades ser direcionadas para outros campos da geologia. Segundo Telford et al. (1990), o método da eletrorresistividade baseia-se no estudo do potencial elétrico tanto dos campos elétricos naturais, como dos campos provocados artificialmente. A partir de medições do potencial elétrico na superfície pode-se determinar, no subsolo, a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas. Conhecendo-se a corrente e os potenciais gerados, é possível calcular as resistividades correspondentes. A resistividade é uma medida de dificuldade que um determinado material impõe à passagem da corrente elétrica ou, o inverso, a condutividade é a facilidade com que a corrente elétrica passa através de um certo material.

AQUISIÇÃO GEOFÍSICA

O arranjo dipolo-dipolo foi escolhido para a realização dos levantamentos de campo, principalmente pelo fato que este é um arranjo que responde bem a variações laterais de resistividade. A configuração de eletrodos deste arranjo é de dois eletrodos de emissão de corrente (A e B) e dois eletrodos de potencial (M e N) para a recepção do sinal, dispostos em um mesmo alinhamento e posicionados externamente entre si.

O arranjo dipolo-dipolo pode ser definido como tendo as seguintes características: centro dos dipolos AB e MN deslocam-se ao longo da linha a ser levantada; o espaçamento entre eletrodos AB é igual ao MN e o espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, utilizando-se simultaneamente vários dipolos MN dispostos ao longo da linha.

O levantamento de campo foi realizado sobre uma malha com quinze linhas paralelas e distanciadas 10 metros, com aproximadamente 240 metros de comprimento e uma linha diagonal a estas, com aproximadamente 670 metros de comprimento. O espaçamento entre os pares transmissor de corrente (AB) e receptor

de potencial (MN) foi de 05, 10, 20, 30 e 40 metros, caracterizando vários arranjos dipolares, cada um com vários níveis de investigação.

Para o posicionamento das linhas no terreno foi considerada a direção preferencial do sistema de fraturas observado em fotografias aéreas, na escala 1:10000 e em trabalhos de campo (Kraft et al. 2002), sendo dispostas perpendicularmente a esta direção média, ou seja, possuem direção aproximada SE-NW.

O equipamento utilizado foi um resistivímetro Syscal R1 Plus *Switch* 24 de fabricação da *Iris Instruments*, adquirido com recursos do Projeto Modres. O sistema consiste em um receptor e transmissor acoplados, com bateria interna e comutação integrada. Fazendo parte também duas bobinas com cabos de 120 metros, com doze *takeouts* separados a cada 10 metros.

A figura 5 apresenta o local dos levantamentos geofísicos, com o posicionamento das linhas cobertas por levantamentos geoeletricos. A área escolhida para a aquisição dos dados apresenta um relevo relativamente plano, sendo localizada sob um platô de dimensões consideráveis e próxima à escarpa principal.

PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados obtidos foram inicialmente, como usual, plotados em pseudo-seções de resistividade aparente, numa fase seguinte foi feita a modelagem 2D através de inversão, gerando as seções modelo. Ao se realizar um levantamento de eletrorresistividade obtêm-se valores de resistividade que não representam verdadeiramente a distribuição deste parâmetro físico em subsuperfície. Neste sentido Greenhouse et al. (1995) consideram que as pseudo-seções não devem ser consideradas como uma imagem literal da subsuperfície. Entretanto, a pseudo-seção é uma representação útil dos valores de resistividade aparente e é utilizada como guia inicial para interpretação qualitativa. Segundo Loke (1999), uma aplicação prática das pseudo-seções é a facilidade de supressão de medidas de má qualidade ou até mesmo erradas que são evidenciadas. Tais medidas normalmente aparecem sob a forma de resistividades muito baixas ou muito altas.

A segunda parte do processamento consistiu em efetuar a inversão dos dados de campo, resultando em uma interpretação quantitativa da seção geoeletrica. Segundo Rigoti (1998) a inversão de dados elétricos pode ser descrita como a mudança iterativa de parâmetros do modelo até que se obtenha o melhor ajuste entre os dados calculados a partir do modelo e os dados observados. Por outro lado, o melhor ajuste é limitado ao erro contido nos dados (Rigoti & Crossley



Figura 5 – Fotografia aérea com o posicionamento das linhas de levantamentos geoeletricos. *Aerial photograph with the resistivity survey lines.*

1987), que em medidas de resistividade como as efetuadas no presente estudo fica, em média, em torno de 5%.

O procedimento de inversão dos dados foi realizado com um programa de computador que divide a subsuperfície em blocos e atribui a eles as respectivas resistividades, e então processa os valores de resistividade aparente que se ajustem aos valores medidos em campo. No processo de inversão fez-se muita experimentação modificando os parâmetros que controlam a convergência para o modelo final. Tem-se a opção de resolver o problema direto no processo de inversão com a técnica de elementos finitos ou com a técnica de diferenças finitas. Como os dados continham informação topográfica foi utilizado o método de elementos finitos. O processo de inversão permite ainda escolher métodos que influem sobre a convergência e sobre

o tipo de modelo a ser obtido. Neste sentido, o método de Marquardt (ou *ridge regression*) permite que, com a escolha adequada do fator de Marquardt se tenha a convergência assegurada, enquanto que o método Occam, (ou *smoothness-constrained*) representa uma imposição sobre o modelo, de forma que a resistividade varie suavemente no mesmo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Deve-se lembrar que os resultados não descrevem diretamente situações geológicas, mas sim refletem a distribuição da propriedade física que pode ser anômala quando ocorrem contrastes nesta propriedade física. As anomalias detectadas ou respostas padrão observadas precisam ser correlacionadas da forma mais realista possível com a geologia (Campos et al. 2003).

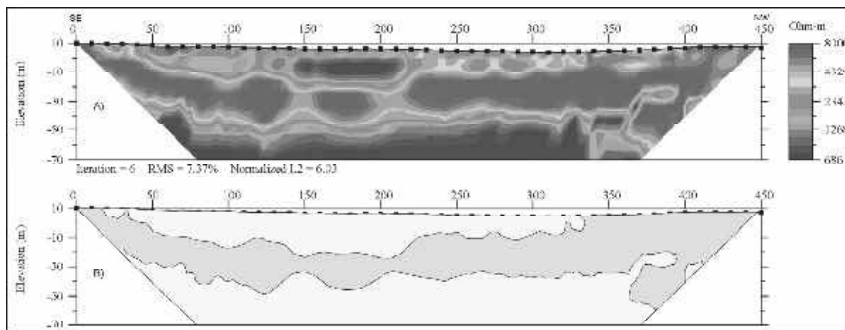


Figura 6— Modelo de resistividade referente à linha 04 (A), com a classificação (B) da zona de alta (cor cinza) e baixa resistividade (cor branca). Line 04 resistivity model (A), and the classification (B) of high (gray color) and low resistivity (white color).

A figura 6 apresenta o modelo de resistividade da linha 04. Inicialmente foi realizada uma classificação, por meio das análises das feições geoeletricas e divididos os modelos em duas classes principais: uma classe relacionada a valores acima de 4000 Ohm.m (em cinza) e outra classe com valores abaixo deste valor (em branco). Nesta figura observa-se uma camada bem resistente, limitada no topo e na base por porções menos resistentes. Essa variação pode ser relacionada ao elevado grau de heterogeneidade e/ou anisotropia estrutural, deposicional e diagenética observada nos intervalos arenosos (Rostirolla et al. 2000, Trzaskos-Lipksi et al. 2003, Vesely et al. 2003, Bocardi et al. 2003). De acordo com Rostirolla et al. (2000), a porção superior da área corresponde à subunidade lcm4, composta essencialmente por arenitos. O valor típico de resistividade para esta litologia é caracteristicamente mais baixo do que o valor observado no modelo de resistividade. Esta situação pode ser relacionada ao grau de compactação, cimentação por sílica e/ou preenchimento por óxidos de ferro destes intervalos arenosos, como Bocardi et al. (em preparação) relatam, repercutindo em permeabilidade baixa e valores de porosidade de 1% a 12%, desta forma dificultando a percolação por água.

Para apreciar a correlação entre as respostas geoeletricas a feições geológicas e estruturais existentes na área de estudo, foi feita a sobreposição das seções de resistividade às fraturas observadas em fotografias aéreas e em trabalhos de campo (Campos et al. 2003). Da mesma forma foi realizada uma correlação entre a resistividade e as litologias descritas em trabalhos anteriores, principalmente no trabalho de Rostirolla et al. (2000).

É importante ressaltar que as fraturas apresentam-se cimentadas por óxidos de ferro e/ou sílica (Rostirolla et al. 2000, Trzaskos-Lipksi et al. em preparação) e que esta situação reflete-se nos valores de resistividade observados. Em alguns casos, como na linha 04 (figura 7), percebe-se que não ocorre uma alteração significativa na resistividade, apenas uma ligeira variação, não saindo da faixa de valores com alta resistividade. Desta forma pode-se identificar as zonas fraturadas pela análise de deslocamentos ou perturbações nos valores de resistividade.

A figura 7 apresenta a correlação entre o modelo geoeletrico e informações geológicas para a linha 04. Esta figura mostra que o modelo gerado pela inversão permitiu discriminar o contato entre os arenitos da subunidade lcm4 com os folhelhos da subunidade lcm2, sendo este contato representado por uma zona menos resistente iniciando-se há cerca de 50 metros de profundidade, sobreposta a uma camada mais resistente, associada aos arenitos da lcm4. Outro aspecto a ressaltar nesta figura é a indicação de geometria irregular da camada de arenitos da subunidade lcm4. Da mesma forma observa-se um deslocamento de resistividade, representando uma geometria semelhante a um graben.

A figura 8 mostra a classificação dos modelos de resistividade em duas classes principais: uma zona de alta resistividade (cor cinza), com valores acima de 4000 Ohm.m, e uma zona de baixa resistividade (cor branca). Esta classificação foi utilizada para a interpretação das feições que foram associadas a fraturas. As fraturas em branco correspondem a feições relacionadas a zonas de alta resistividade, enquanto que as fraturas em preto foram traçadas analisando-se os baixos de resistividade no modelo. Foi realizado o procedimento

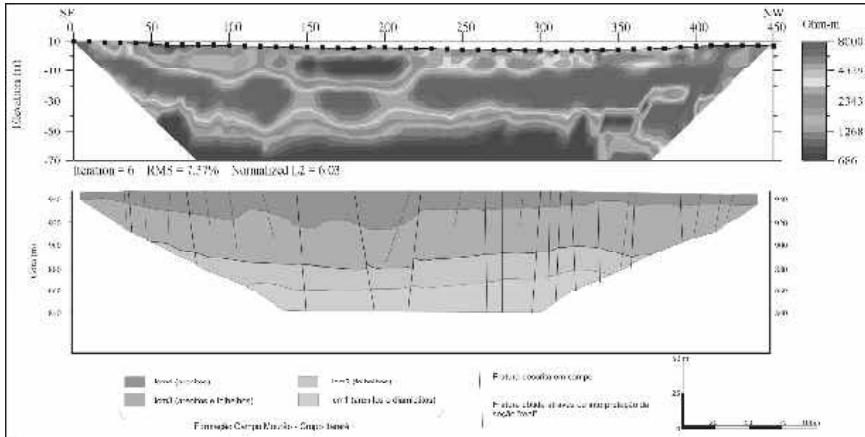


Figura 7 – Correlação entre a resposta geoeétrica do modelo de resistividade da linha 04 e informações geológicas e estruturais. *Resistivity correlation of line 04 resistivity model and geologic and structural data.*

de transportar as fraturas interpretadas nos modelos para o mapa em planta, considerando-se que cada fratura no modelo corresponde a uma faixa em metros. Observa-se que houve uma associação entre os valores de resistividade e algumas fraturas mapeadas. As fraturas que ocorrem próximo à escarpa, apresentam-se mais descontínuas e caracteristicamente possuem elevados valores de resistividade, sendo representadas retângulos cinzas. Segundo Trzaskos-Lipski et al. (em preparação), as estruturas rúpteis localizadas a leste do graben, apresentam como característica principal o fato de estarem fechadas e preenchidas por óxidos de ferro, com ocorrência de bandas de deformação e ressaltos no relevo. Estas características justificam os valores elevados de resistividade encontrados nestas fraturas. Em contrapartida, algumas fraturas apresentam-se mais contínuas, possuem baixos valores de resistividade associados, sendo representadas por retângulos pretos. Estas fraturas, localizadas a oeste do graben, apresentam-se mais contínuas e abertas, conforme também relatado em Trzaskos-Lipski et al. (em preparação), facilitando desta forma a percolação de água, associada a uma porosidade mais alta.

A figura 9 apresenta os modelos de resistividade onde é possível acompanhar a continuidade de algumas fraturas com resposta de alta resistividade (traços brancos) em determinados perfis elétricos (1a, 1b, 1c, 2, 2a e 2b). Da mesma forma existe uma continuidade

de algumas fraturas (traços pretos) associadas a baixos valores de resistividade em todos os perfis elétricos.

MODELO PSEUDO-3D

A partir dos modelos 2D foi gerado um modelo pseudo-3D da área de estudo. Neste procedimento inicialmente foi gerada uma tabela no formato x , y , z e g , sendo o x , y e z as coordenadas utm e profundidade respectivamente de cada ponto de medida, com a variável g representando o valor de resistividade. Após a análise deste conjunto de dados, foram selecionados intervalos de profundidades médias que representassem determinadas "fatias" do modelo sólido. Na definição destas fatias foi analisada a quantidade de dados dentro destes intervalos que possibilitassem uma resolução compatível. Foi utilizado o método de interpolação vizinho mais próximo com resolução de dois metros. A figura 10 apresenta o modelo pseudo-3D de resistividade, na qual é possível visualizar a distribuição tridimensional dos valores de resistividade. Da mesma forma que nos modelos 2D de inversão, o modelo pseudo-3D apresenta elevados valores de resistividade como "background" em meio aos quais salientam-se as respostas geoeletricas de feições geológicas e estruturais. É importante ressaltar que o valor máximo de resistividade do bloco diagrama corresponde a 20.000 Ohm.m, entretanto ocorre um pre-

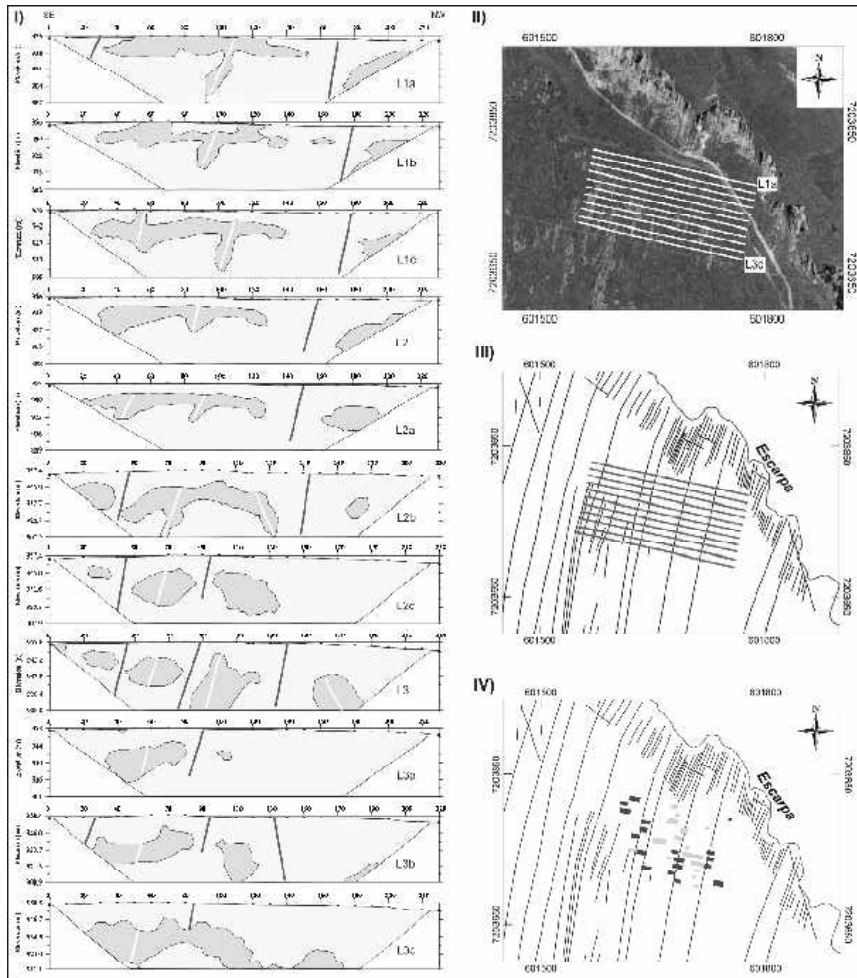


Figura 8 - I: Classificação em zona de alta (cor cinza) e baixa resistividade (cor branca) a partir dos modelos de resistividade. II: Fotografia aérea com posicionamento das seções elétricas. III: Fraturas interpretadas em fotografia aérea e posicionamento das linhas adquiridas. IV: Correlação entre as fraturas interpretadas a partir dos modelos de resistividade com as fraturas mapeadas. Ver descrição no texto. I: The high zone (gray color) and low resistivity (white color) classification of the resistivity. II: Aerial photograph with positioning of electric sections. III: Interpreted fractures in aerial photograph and positioning of the acquired lines. IV: Correlation between interpreted fractures from the models of resistivity and the mapped fractures. Description inside the text.

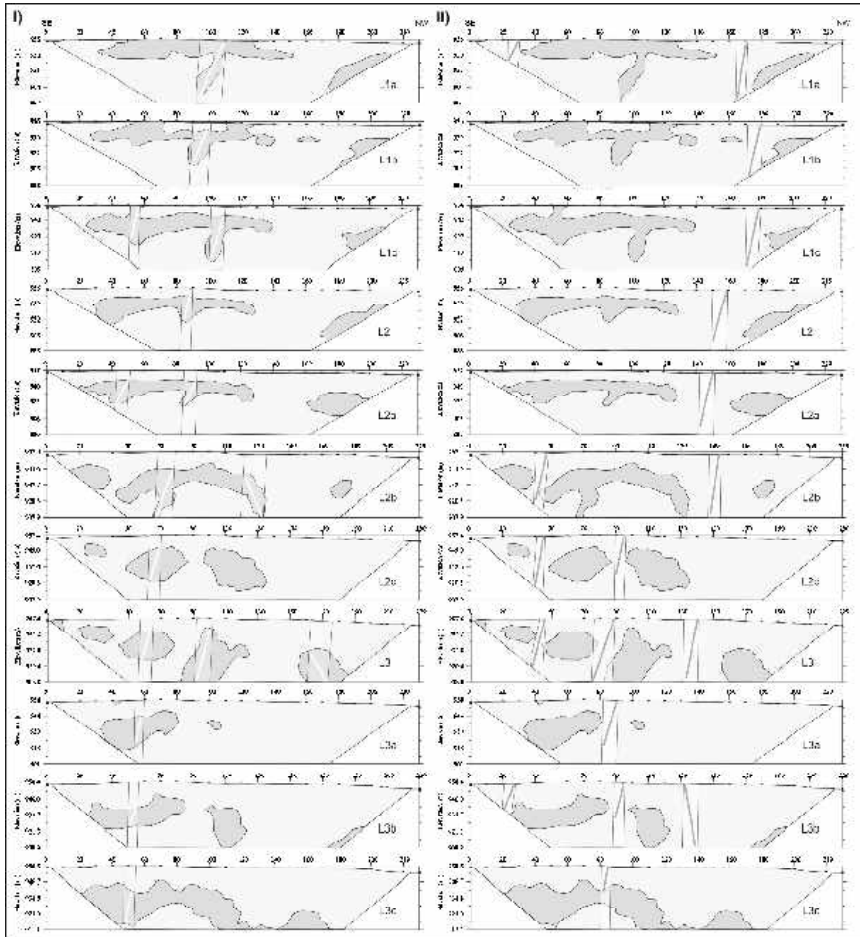


Figura 9 – I) Modelos de resistividade classificados em zonas de alta (cor cinza) e baixa (cor branca). Os traços brancos representam fraturas interpretadas com base na análise dos modelos de altos valores. II) Os traços pretos representam fraturas interpretadas com base na análise dos modelos de baixos valores. II) Resistivity models classified in zones of high (gray color) and low (white color). The white traces represent interpreted fractures on the basis of the analysis of the models of high values. II) The black traces represent interpreted fractures on the basis of the analysis of the models of low values.

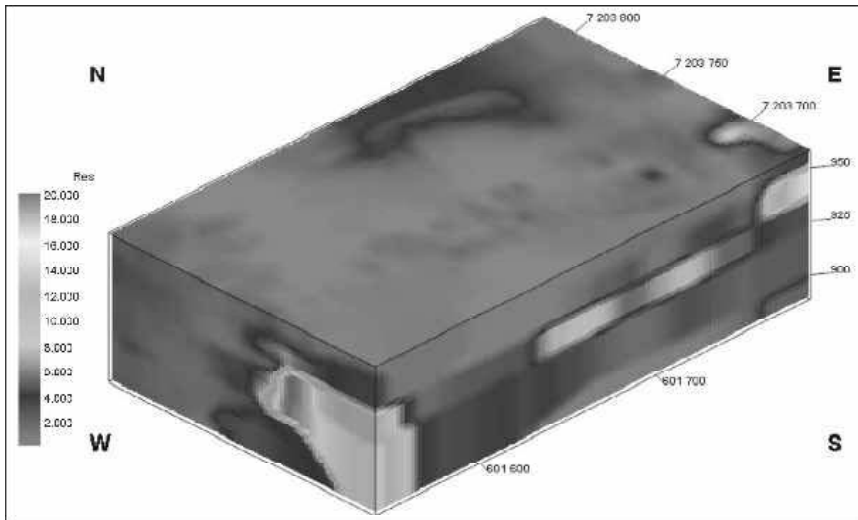


Figura 10 – Bloco diagrama do modelo pseudo-3D de resistividade, visão para norte. *Block diagram of the pseudo-3D resistivity model, north vision.*

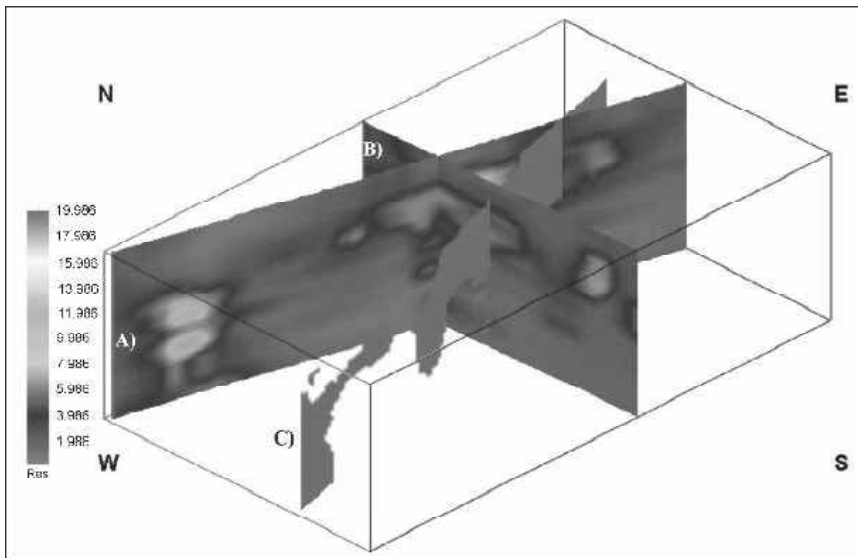


Figura 11 – Diagrama em cerca da linha 01c (A) e linhas arbitrárias (B e C). Em (C) os valores de resistividade associados aos arenitos. *Fence diagram of line 01c (A) and arbitrary lines (B and C). In (C) the values of resistivity associated to sandstones.*

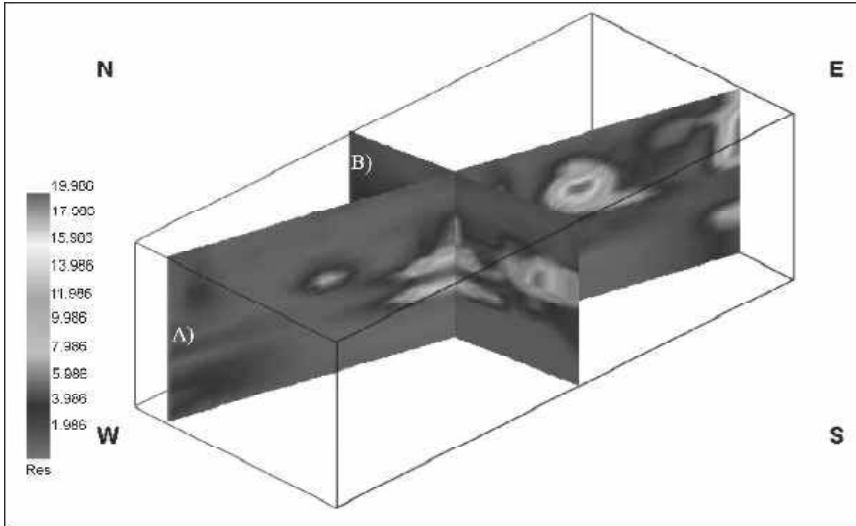


Figura 12 – Diagrama em cerca da linha 03 (A) com cruzamento de linha arbitrária (B). Fence diagram of line 03 (a) with an arbitrary line (B).

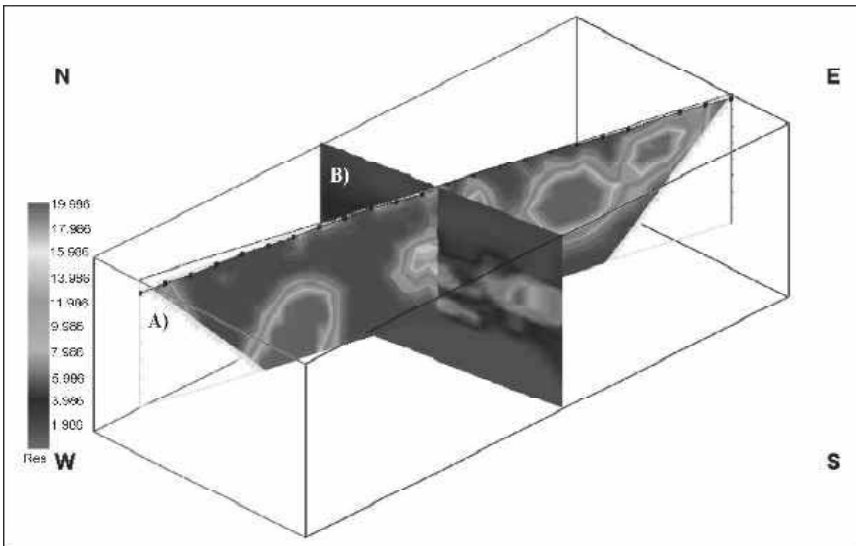


Figura 13 – Correlação entre modelo 2D de resistividade da linha 03 (A), obtido pelo processo de inversão, com o modelo pseudo-3D, através de uma linha arbitrária (B), de direção aproximada N-S. Correlation of line 03(A) 2D resistivity model with the pseudo-3D model along an arbitrary N-S line (B).

domínio de valores dentro da faixa de 2000 a 8.000 Ohm.m, compatível com os valores apresentados pelos modelos 2D de inversão.

A figura 11 apresenta diagrama em cerca da linha 01c (A) e duas linhas arbitrárias extraídas do modelo pseudo-3D, uma de direção aproximada N-S (B), e outra de direção aproximada SW-NE (C), correlacionada com os arenitos (C). Nota-se que a linha arbitrária N-S apresenta uma feição resistente que pode ser correlacionada aos arenitos. Esta feição resistente também ocorre na linha 01c, sendo desta forma possível associar esta feição à ocorrência de arenitos nesta posição. É interessante ressaltar que no ponto de interceptação entre a linha arbitrária N-S e a linha 01c, ocorre um perfeito "casamento" desta feição resistente, demonstrando a continuidade da mesma dentro do modelo 3D.

A figura 12 apresenta um diagrama em cerca com cruzamento da linha 03 (A) com uma linha arbitrária, extraída do modelo pseudo-3D, de direção aproximada N-S (B). É importante notar o ajuste entre as linhas no ponto de interceptação entre as mesmas, permitindo acompanhar a continuidade de uma feição muito resistente, tanto em direção N-S como lateralmente na linha 03. Esta feição resistente também foi observada nos modelos 2D de resistividade, assim como sua continuidade norte-sul nos demais perfis geoeletricos.

Ressalta-se que todo procedimento de representação 3D a partir de informações bidimensionais pode gerar feições nos modelos que não correspondam fielmente com a realidade. Esta é uma característica inerente a todo processo de interpolação. Um exemplo desta situação pode ser observado na figura 13, que apresenta o modelo 2D de resistividade da linha 03 (A) obtido pelo processo de inversão e a interseção deste com uma linha arbitrária (B), extraída do modelo pseudo-3D, de direção aproximada N-S, gerada pelo modelo pseudo-3D. Conforme podemos observar ocorre uma extrapolação de informações para fora da área que contém dados, desta forma diminuindo o grau de confiança nas porções laterais dos modelos pseudo-3D. Em contrapartida, podemos observar a coerência entre os dois tipos de informações na área do cruzamento entre as linhas, onde em ambos os casos ocorrem feições

resistentes. Deve-se levar em consideração que os modelos não apresentam uma mesma escala de cor, o que explica em parte o deslocamento aparente destas feições resistentes. Aproximadamente estas feições resistentes estão dentro de um mesmo intervalo.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem correlacionar os valores de resistividade com feições geológicas, mais especificadamente com a geometria das camadas e o contato entre litologias diferentes. De maneira geral, foi observado que o condicionamento estrutural, representado pelas fraturas descritas, influenciam os valores de resistividade observados nos modelos. Altos de resistividade foram correlacionados a algumas fraturas mapeadas, possivelmente indicando que estas se encontram fechadas, enquanto que baixos de resistividade podem indicar fraturas mais abertas, com maior facilidade de percolação de água associada a uma porosidade maior.

A utilização de dados de resistividade, conjugados a outras informações geológicas permite identificar feições que auxiliam na caracterização de arenitos fraturados do Grupo Itararé, Bacia do Paraná, que na área de estudo constituem uma situação geológica aflorante, similar a um reservatório fraturado.

Adicionalmente aos resultados descritos, a resistividade mostra valores muito altos (milhares de Ohm.m), distribuídos de forma uniforme, mesmo nos níveis mais arenosos. Justamente estes níveis são os que poderiam hospedar fluidos e constituir reservatórios. A alta resistividade mostra contudo que ainda que a porosidade seja razoável, a permeabilidade da seção geológica analisada é muito baixa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CTPETRO/FINEP/PETROBRAS pelo financiamento da pesquisa, a UFPR pelo apoio institucional e ao CNPq pelas bolsas de pesquisa. Os autores também expressam seus agradecimentos aos demais integrantes do Projeto Modres, que colaboraram em todas as fases desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- APPI C.J.; ROSTIROLLA S.P. 2004. Modelagem da anisotropia em sistemas fraturados a partir de estudos de alta resolução na Bacia do Paraná, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro. 12(1):125-147.
- BOCARDI L. B., FERNANDES L. A., VESELY F. F., ROSTIROLLA S. P., APPI C. J. 2003. Petrographic and diagenetic aspects of the Lapa and Vila Velha sandstones, Itararé Group, Paraná Basin, Brazil. In: Latin American Congress of Sedimentology, *Anais...*, Belém.
- BOCARDI L.B.; FERNANDES L.A.; ROSTIROLLA S.P.; APPI C.J. (em preparação). *Características diagenéticas e parâmetros petrofísicos em reservatórios análogos*. Estudo de caso nos arenitos da Formação Campo Mourão, Grupo Itararé, Carbonífero-Permiano (Bacia do Paraná).
- CAMPOS A.F. DE; RIGOTI A.; ROSTIROLLA S.P.; APPI C.J.; KRAFT R.P.; BARTOSZEK M.K. 2003. Eletrorresistividade como apoio à caracterização de arenitos fraturados. In: SBGF, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 8, Rio de Janeiro, *Anais...* (digital).
- CASTRO J.C. de. 1999. Estratigrafia de seqüências das formações Campo Mourão (Parte Superior) e Taciba, Grupo Itararé, Leste da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(2):255-260.
- FRANÇA A. B.; POTTER P. E. 1988. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro. 2, 2/4, 147-191.
- FRANÇA A. B.; WINTER, W.R.; ASSINE M.L. 1996. Arenitos Lapa-Vila Velha: Um modelo de sistemas subaquosos canalobos sob influência glacial, Grupo Itararé (C-P), Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(1):43-56.
- GREENHOUSE J.; GUDJURGIS, P.; SLAINE, D. 1995. *An Introduction to Applications of Surface Geophysics in Environmental Investigations*. Orlando, 121 p. (Notas de Curso).
- KRAFT R.P.; ROSTIROLLA S.P.; BOCARDI, L.B.; CAMPOS A.F. de; LONARDELLI J.N. 2002. Análise petrofísica na caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos um estudo nos arenitos "Lapa-Vila Velha" do Estado do Paraná. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, *Anais...*, 1:270.
- LOKE M.H. 1999. *Electrical Imaging Surveys for Environment and Engineering Studies: A practical guide to 2D and 3D surveys*. Malaysia.
- RIGOTI A.; CROSSLEY D.J. 1987. Reduction of ambiguity in geoelectric models using multiple data sets. *Revista Brasileira de Geofísica*, 5:29-41.
- RIGOTI A. 1998. *Exploração Geofísica Terrestre por Métodos Gravimétricos, Magnetométricos e Gamaespectrométricos*. Curso de Aperfeiçoamento em Exploração Mineral (EXMIN 98) – ADIMB. 53 p.
- ROSTIROLLA S.P.; APPI C.J.; MANCINI, F.; KRAFT, R.P.; BARTOSZEK, M.K. 2000. Fraturas controladoras da migração de fluidos nos Arenitos Vila Velha, Grupo Itararé, Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 31:349-356.
- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E. 1990. *Applied Geophysics*. New York, Cambridge University Press , 770 p.
- TRZASKOS-LIPSKI B.; ROSTIROLLA S. P.; VESELY F. F.; BOCARDI L. B.; MANCINI, F.; APPI, C.J. 2003. Microtectônica e sua importância no estudo da migração de fluidos em reservatórios fraturados do Grupo Itararé - Bacia do Paraná In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 9, 2003, Búzios. *Boletim de Resumos*.
- TRZASKOS-LIPSKI B.; ROSTIROLLA S.P.; BOCARDI L.B. (em preparação). Análise microestrutural - uma ferramenta para a determinação da evolução tectônica, estudo de caso: arenitos Vila Velha.
- VESELY F.F.; TRZASKOS-LIPSKI B.; KRAFT R.P.; ROSTIROLLA S.P. APPI C.J. 2003. Facies architecture of a Permocarboneferous sandstone reservoir analogue, Itararé Group, Paraná Basin, Brazil. In: SBG, Latin American Congress of Sedimentology, 3, *Abstract Book*, p.67-69.
- ZALÁN P.V.; WOLFF S.; CONCEIÇÃO J.C. DE; MARQUES A.; ASTOLFI M.A.M.; VIEIRA I.S.; APPI V.T.; ZANOTTO O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: GABLAGIA G.P.R.; MILANI E.J. (coord.). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Ed. Gávea, 135-168.

Recebido em 24 set. 2004
Aceito em 23 maio de 2005