



**Universidade Federal da Bahia**  
Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia



---

**REDE COOPERATIVA: COMPORTAMENTO DE BACIA  
SEDIMENTARES NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE  
BRASILEIRO  
PROJETO  
AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO AQÜÍFERO URUCUIA NAS  
SUB-BACIAS DOS RIOS ARROJADO E FORMOSO, BAHIA**

---

Coordenador

Olivar A. L. de Lima

Salvador, Agosto de 2007

# **LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS NO AQUÍFERO URUCUIA: SUB-BACIAS DOS RIOS ARROJADO E FORMOSO, BAHIA.**

Olivar A. L. de Lima

## **RESUMO**

As características hidrogeológicas do sistema aquífero Urucuia nas sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso foram estudadas usando dados geológicos de poços, sondagens elétricas verticais e levantamento gravimétrico regional. Perfis litológicos e geofísicos de poços profundos perfurados no sistema Urucuia, na área estudada e nas vizinhas sub-bacias dos rios das Fêmeas e dos Cachorros, possibilitaram a identificação de três facies geofísicos constituintes dessa seqüência, identificados como as formações geológicas: Serra das Araras, Posse e Geribá. Sessenta e cinco sondagens elétricas Schlumberger, expandidas até uma separação máxima de eletrodos de corrente AB/2 de 1.000 m, foram usadas para definir a geometria do aquífero e a estrutura de seu substrato no intervalo de profundidades entre zero e 500 m. A inversão automática unidimensional dos dados de resistividade versus AB/2 foi calibrada com dados de poços, ajustando-se os valores da profundidade do nível freático. Os resultados geoeletricos permitiram inferir a natureza não-confinada do fluxo subterrâneo no aquífero e mapear algumas de suas interfaces geológicas internas. Permitiram também definir a estrutura e composição do seu substrato, assim como detectar um divisor de fluxo na porção ocidental da área. Localmente, é possível a ocorrência de condições de confinamento parcial causadas por intensa silicificação de alguns horizontes arenosos. A definição das características litológicas do aquífero Urucuia e de seu substrato foi obtida da combinação dos dados de poços com os resultados das sondagens elétricas verticais e de gravimetria. Quinhentas e sessenta estações gravimétricas e geodésicas foram levantadas na área com uma densidade aproximada de 2,8 estações por 100 km<sup>2</sup>. Mapas da gravidade absoluta, de anomalia Bouguer e de anomalias gravimétricas residuais permitiram definir mais precisamente a estrutura de blocos falhados inferida dos dados geoeletricos, assim como delinear a configuração regional do substrato subjacente ao Grupo Urucuia.

## ABSTRACT

The hydrogeologic characteristics of the Urucuia aquifer system within the Arrojado and Formoso river sub-basins were studied using vertical geoelectrical soundings and gravimetric maps. Lithologic and geophysical logs of deep production wells, both in the studied area and in the neighboring das Fêmeas and Cachorros rivers sub-basins, allows to identify three geophysical facies within the Urucuia Group identified as the geological formations: Serra das Araras, Posse e Geribá. Sixty five Schlumberger resistivity soundings, expanded to a maximum current AB/2 spacing of 1.000 m, were used to define the aquifer geometry and the structure of its substratum within the depth range from 0 to 500 m. The automatic inversion of the apparent resistivity data were checked against well drilling data, basically by adjusting the depth to the top of the water table of the system. These sounding results allow to infer the general unconfined nature of the groundwater flow within the aquifer and to map some of their internal geological interfaces. They also allow recognizing the lithology and structure of its substratum and the presence of a groundwater divide in the occidental portion of the basin. In some places there is a local confinement caused by intense silicification of some sandstone horizons. The definition of the lithologic characteristics of the Urucuia aquifer and of its substratum was obtained from the combination of well data and the electrical sounding and gravimetric results. Five hundred and sixty gravimetric and geodetic stations were surveyed within the studied area, at an approximated density of 2.8 stations by 100 km<sup>2</sup>. A regional Bouguer gravity map and two residual anomaly maps were useful to define more precisely the block faulting structure inferred from the electrical sounding data, and the regional geometry of the substratum underlying the Urucuia Group.

## 1. INTRODUÇÃO

As sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso ocupam uma área de cerca de 20.000 km<sup>2</sup>, no extremo ocidental do estado da Bahia. Esta área, que faz parte do chamado Chapadão Urucuia, está passando por um acelerado desenvolvimento de agricultura irrigada com uso intensivo, mas não dimensionado, de suas reservas de água subterrânea. Como essas reservas hídricas não estão ainda devidamente avaliadas e dimensionadas, há sérios riscos de se estar promovendo uma super-exploração do mais importante sistema aquífero do estado.

O sistema aquífero Urucuia, na Bahia, compreende uma espessa seqüência de arenitos fluvio-eólicos depositados no início do período Cretáceo. Constitui um amplo chapadão, com cerca de 80.000 km<sup>2</sup> de extensão, esculpido em terrenos predominantemente arenosos. A rede de drenagem nele superposta é constituída por rios e riachos perenes, estruturalmente controlados, de cursos retilíneos e subparalelos, geralmente orientados de WSW para ENE, constituindo a expressão superficial do fluxo hídrico num dos maiores reservatórios de água potável do país. É este amplo sistema hídrico que regula uma grande parcela da vazão do rio São Francisco.

Nas últimas décadas tem se desenvolvido, em todo chapadão, um processo acelerado de agricultura mecanizada, substituindo o cerrado nativo, através de irrigação permanente e de grande desperdício de água, principalmente em culturas de soja, café, arroz e algodão. Desta forma, um grande número de poços já foi perfurado no aquífero Urucuia, tanto para abastecimento humano, quanto para extensivas irrigações sem, contudo, ter sido avaliada sua hidrogeologia com propriedade.

A região selecionada para estudos se situa num dos ambientes mais ricos do estado da Bahia, em termos de recursos hídricos. Seu desenvolvimento agroindustrial acelerado está exigindo do estado um controle mais rigoroso de outorga e monitoramento dos recursos hídricos ali disponíveis, que ainda não foram completamente dimensionados. Os trabalhos aqui apresentados se enquadram no objetivo de fornecer subsídios básicos para embasar as decisões de tal regulação.

Este relatório técnico se refere aos levantamentos geofísicos regionais executados na área visando atender aos objetivos do convênio nº 01.04.0623.00 firmado entre a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e as Universidades Federais da Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Paraíba. Este convênio, firmado como uma Rede Cooperativa de Pesquisa com as universidades mencionadas, buscou avaliar o *Comportamento de Bacias Sedimentares na Região Semi-*

*Árida do Nordeste Brasileiro*. No caso em foco, os objetivos técnico-científicos a serem alcançados consistiram na delimitação geométrico-estrutural dos aquíferos presentes no Grupo Urucua, assim como na definição do arcabouço estrutural do aquífero e da bacia sedimentar do São Francisco, na área do projeto, até o topo do embasamento cristalino proterozóico.

Este trabalho constitui uma contribuição técnico-científica desenvolvida para melhor entender o comportamento hidrogeológico do Grupo Urucua na área estudada (Fig.1). Nele são integrados dados geológicos de superfície e de poços, com dados geofísicos de sondagens elétricas verticais e de gravimetria, executados na área com o intuito de definir, em escala regional, suas feições geométrico-estruturais, características hidráulicas e a qualidade das águas de seus principais horizontes aquíferos. Sessenta e cinco sondagens elétricas verticais de IP-resistividade e 560 estações plani-altimétricas DGPS e gravimétricas, distribuídas na área numa equidistância aproximada de 8,0 km, foram levantadas visando efetivar a presente caracterização hidrogeofísica.

Os levantamentos geofísicos foram executados pelo Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA (CPGG/UFBA), integrante da Rede Cooperativa, nas formas de um projeto de pesquisa (levantamento geoeletrico) e de um contrato de prestação de serviços firmado entre a CPRM e a UFBA (levantamento gravimétrico), ambos com a interveniência da Fundação Escola Politécnica (FEP).

## **2. GEOLOGIA DE SUPERFÍCIE**

A área do Chapadão Urucua corresponde a uma região de relevo aplainado com altitudes variando de 900 - 1000 m, no estado de Goiás, até 550 - 650 m, no estado da Bahia. Esse extenso planalto contém o divisor das águas superficiais entre as bacias dos rios Tocantins e São Francisco referido como a escarpa da Serra Geral. Nele, toda a rede de drenagem, afluente da margem esquerda do rio São Francisco, tem padrão de cursos perenes, retilíneos e paralelos a subparalelos. São rios competentes, estruturalmente controlados e grandemente alimentados por deflúvios de águas subterrâneas.

O clima no Chapadão é do tipo tropical quente e úmido com pluviometria média anual crescendo de 700 a 1.600 mm, do São Francisco para oeste. O período das chuvas se estende de novembro a abril, com alturas máximas mensais superiores a 100 mm, geralmente entre dezembro e fevereiro. Nos meses restantes atua um regime de estiagem prolongada. As médias das máximas temperaturas situam-se entre 30 e 33°C no verão, enquanto as médias

das mínimas alcançam entre 18 e 20°C, no inverno. A evapo-transpiração potencial varia no intervalo de 1.100 a 1.200mm/ano (Brasil, 1982).

O Grupo Urucuia se compõe de arenitos quartzosos de cores variadas, predominando castanho-avermelhados, róseos e amarelo-esbranquiçados. Nesses arenitos a granulometria varia de fina a média e, em geral, são friáveis e limpos. Em alguns horizontes podem ocorrer argilas disseminadas em suas matrizes. Localmente, aparecem cimentados com material silicoso ou carbonático. Incluem intercalações siltosas e siltico-argilosas e freqüentes níveis conglomeráticos dispersos. Zonas silicificadas são comuns ao longo de fraturas e falhas e ocorrem em horizontes subsuperficiais cortados por poços tubulares. Com base na flora de micro e microfósseis foi datada como de idade Cretáceo Inferior (Moutinho da Costa et al., 1976; Ghignone, 1979).

A estratigrafia do Grupo Urucuia não parece estar ainda bem estabelecida, tanto no que se refere à nomenclatura quanto a sua caracterização faciológica. Oliveira (1967), trabalhando na parte sudoeste da bacia São Francisco, dividiu a Formação Urucuia em dois membros. O inferior, denominado Membro Geribá, seria representado por uma seqüência argilosa composta de folhelhos, siltitos, arenitos finos e argilitos arenosos e calcíferos, de cores vermelho-tijolo, avermelhada ou rósea. Folhelhos pretos, betuminosos, contendo restos de plantas e peixes fossilizados foram incluídos nesse membro. O superior, denominado Membro Abaeté, englobaria uma seqüência relativamente espessa e homogênea de arenitos quartzosos róseos, finos a médios, muitas vezes impuros e com níveis conglomeráticos locais. Estratificações cruzadas acanaladas nos arenitos e seixos facetados nos conglomerados caracterizam esse membro.

Campos e Dardenne (1997), trabalhando na parte mineira da bacia Sanfranciscana, subdividiram o Grupo Urucuia em duas formações denominadas de Posse (inferior) e Serra das Araras (superior). A inferior é descrita como constituída de arenitos uniforme com estratificações cruzadas de grande porte e com níveis conglomeráticos intercalados. Parece corresponder ao Membro Abaeté de Oliveira (1967). Na superior, os arenitos ocorrem em bancos empilhados com espessuras métricas e estratificações paralelas, e contém argilas disseminadas em suas matrizes. A relação de contato entre elas é definida por uma discordância erosiva. Essa subdivisão tem sido acatada em vários trabalhos de hidrogeologia desenvolvidos nos últimos anos na bacia do São Francisco (GEF, 2004; Amorim Junior e Lima, 2007).

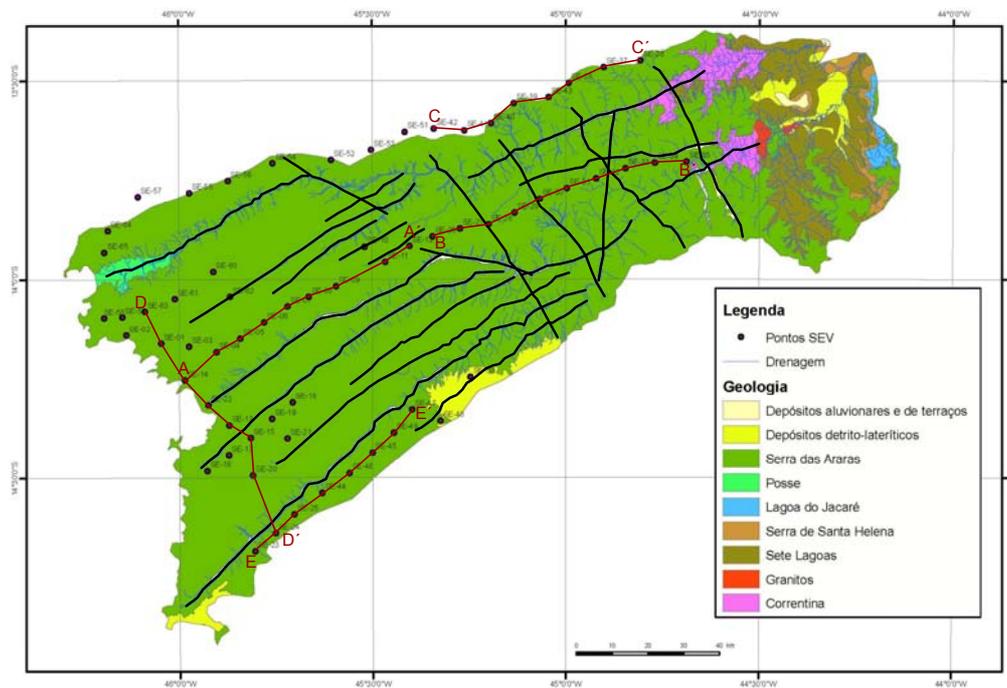
Neste projeto, utilizando dados geofísicos de poços e de superfície se está propondo uma subdivisão do Grupo Urucuia em três formações, com adição à classificação de Campos

e Dardenne (1997) da Formação Geribá, que possui características similares as do membro inferior da subdivisão proposta por Oliveira (1967), ora elevado à categoria de formação geológica. Seu contato com a Formação Posse é gradativo, definido por uma zona de transição com cerca de 20m de espessura.

Em geral, em função de estruturas sedimentares internas e conteúdo fóssilífero, o Grupo Urucuia tem sido interpretado como depositado em ambiente continental, inicialmente lacustre, mas passando a fluvial dominante, com expressivas contribuições eólicas (Lima e Leite, 1978; Ghignone, 1979). Essa espessa cobertura de plataforma se formou em resposta à transgressão Albo-aptiana associada à separação continental da América do Sul da África (Ghignone, 1979).

O Grupo Bambuí constitui o substrato no qual foram depositados, em discordância erosiva, os depósitos do Grupo Urucuia. Compreende uma espessa seqüência pelítico-carbonática, de idade Proterozóica. Compõe-se de calcários, calcários dolomíticos, dolomitos, margas, siltitos e argilitos, resultantes de uma sedimentação em mar epi-continental raso, com subsidência variável ao longo de sua extensão. Foram identificados, nessa seqüência, pelo menos três episódios transgressivos, com seus ciclos regressivos associados (Dardenne, 1978). O ciclo mais superior, representado pela Formação Três Marias, compõe-se de ardósias, meta-siltitos argilosos e meta-arcóseos de cores verdes a cinza-esverdeados, contendo corpos de margas e de calcários.

Embora não haja registros no Brasil de atividades tectônicas expressivas após o Cretáceo, a orientação de grandes fendilamentos no Grupo Bambuí (alinhados preferencialmente segundo N60-70°E), com conjuntos secundários de orientação NW-SE, controlou a evolução estrutural dos depósitos Urucuia. Movimentos de reativação ao longo dessas linhas de fraqueza produziram conjuntos conjugados de falhas e fraturas subverticais, que se expressam na rede de drenagem retilínea em malha retangular, que caracteriza toda a região. Algumas falhas e fraturas podem ser reconhecidas no campo pela presença de estruturas cataclásticas, brechiação e intensa silicificação, que geram verdadeiras muralhas nas escarpas da Serra Geral e em vários 'canyons' da região. O mapa geológico da Figura 1 resume algumas das características geológicas descritas na presente seção. As linhas cheias representam zonas de falhas ou de densos fraturamentos inferidos da orientação e linearidade da rede de drenagem. No mapa da Figura 1 estão lançados também os centros das sondagens elétricas executadas e as orientações das seções geológicas transversais, discutidas mais adiante.



*Figura 1 – Mapa geológico da área de estudo contendo a localização dos centros das sondagens elétricas e a orientação das seções geolétricas transversais.*

### 3. GEOLOGIA DE SUBSUPERFÍCIE

A configuração geométrico-estrutural e a heterogeneidade faciológica dos arenitos do Grupo Urucua foram estudadas com base em perfis litológicos e geofísicos de poços. Dados de perfis geofísicos de dois poços profundos perfurados nas sub-bacias do rio das Fêmeas e dos Cachorros localizadas a norte da área de estudo, e dados geológicos de poços das sub-bacias aqui estudadas, serviram de base para essa caracterização lito-estratigráfica e hidrogeofísica.

**3.1 Dados Geológicos de Poços** - Seções litológicas representativas de poços profundos perfurados na área de estudo estão apresentadas no relatório da Hidrogeologia da área. Dada à distribuição espacial desses furos eles podem ser úteis para caracterizar a variabilidade faciológica do Grupo Urucua. As colunas mostram os principais horizontes reconhecidos por

amostragem de calha, com uma descrição sucinta da litologia, conforme fichas de sondagens desses poços. As colunas, que atingem até quase 300 m de profundidade, são dominadas por pacotes arenosos de granulação fina a média e de cores variando de vermelho a cinza-esbranquiçado. Apesar das dificuldades inerentes a amostragem de calha, se tem reconhecido variabilidades verticais na granulometria e na argilosidade desses arenitos.

As águas superficial e subterrânea, na área estudada, estão muito pouco mineralizadas. A condutância elétrica específica das amostras analisadas varia entre 3 e 30 S/m com totais de sólidos dissolvidos entre 4,0 e 140 mg/l. São águas neutras a levemente ácidas (pH entre 5,2 e 6,6) com os cátions principais, em geral, na ordem  $Na > Ca > Mg$ . Para os ânions não se percebe um ordenamento regular, havendo amostras com  $HCO_3 > Cl > SO_4$  e outras com relação exatamente oposta. Os dados químicos e isotópicos disponíveis mostram que é difícil diferenciar a água subterrânea da água superficial, e estas de uma chuva do interior continental.

**3.2 Dados Geofísicos de Poços** - As Figuras 2 e 3 mostram as colunas litológicas e os perfis geofísicos executados nos poços produtores MO-02, que abastece a sede do município Luiz Eduardo Magalhães, e PE-01 usado na localidade de Perdizes, município de São Desidério. Nesses poços de quase 280 m de profundidades foram corridos perfis elétricos (resistividades aparentes, normal curta (SN) e indução (ILD), e potencial espontâneo (SP)), radioativo (radiação gama), sônico compensado e calibre do diâmetro do furo.

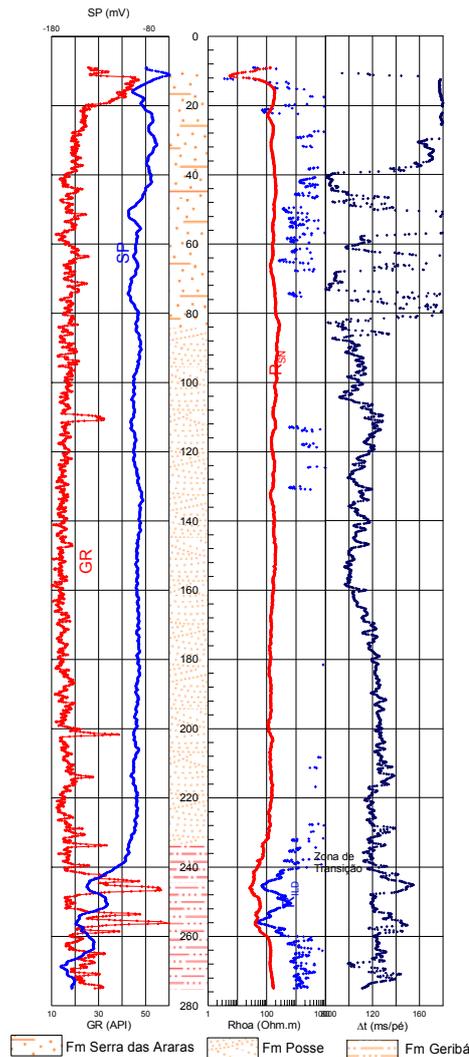
As colunas litológicas nos centros das figuras foram definidas com base na descrição de amostras de calha fornecidas pelos perfuradores, complementadas com a análise desses dados geofísicos. Esses dois poços, que distam entre si cerca de 100 km, mostram excelentes correlações faciológicas e atestam à validade regional da presente análise.

O perfil de radiação gama é um bom indicador da variabilidade litológica vertical ao longo de um furo. Em sucessões areno-argilosas, o aumento na contagem API da radiação gama detectada, corresponde a um aumento na proporção de argila na formação (Asquith, 1990). O conteúdo de argila ou argilosidade de um arenito pode ser avaliado desses perfis usando uma equação empírica não-linear, conforme descrito em Asquith e Gibson (1982). Inicialmente, se calcula um índice de radiação gama pela fórmula

$$I_{GR} = \frac{GR_{\log} - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}, \quad (1)$$

onde,  $GR_{log}$  é a leitura do perfil e  $GR_{min}$  e  $GR_{max}$  são, respectivamente, as leituras mínima e máxima observadas no intervalo perfilado. A fração volumétrica de argila na matriz é calculada então da seguinte expressão

$$V_{cl} = 0,33 \left[ 2^{2I_{GR}} - 1,0 \right] \quad (2)$$



*Figura 2 – Perfis geofísicos corridos no poço MO-02 que abastece a sede municipal de Luiz Eduardo Magalhães.*

Os dados dos perfis elétricos corridos vêm mostrados nas duas faixas à direita das colunas litológicas dos furos, representadas nas Figuras 2 e 3. Usando esses dados e o modelo de condutividade volumétrica para arenitos argilosos proposto por Lima e Sharma (1990;

1992), e retrabalhado por Lima e Sri Niwas (2000) e Lima et al. (2005), foram computadas a porosidade efetiva e a permeabilidade dos arenitos através das relações

$$\phi_e = \left( \frac{\rho_{mf}}{\rho_{xo}} \right) \left\{ \frac{\rho_{cs}^{1/m} - \rho_{xo}^{1/m}}{\rho_{cs}^{1/m} - \rho_{mf}^{1/m}} \right\}^m, \quad (3)$$

e

$$k = \alpha_o \left[ \frac{\phi_e^{(m-1+1/q)}}{1 + \delta_c \sigma_{cs}} \right]^q. \quad (4)$$

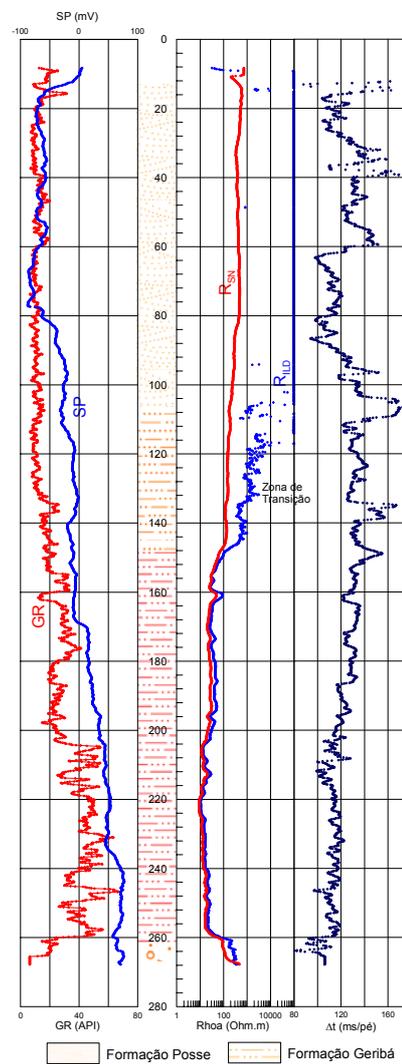


Figura 3 – Perfis geofísicos corridos no poço PE-01 que abastece a vila de Perdizes, município de São Desidério.

Nas equações (3) e (4),  $\rho_{xo}$  e  $k$  são, respectivamente, a resistividade elétrica da zona lavada e a permeabilidade intrínseca da rocha,  $\rho_{mf}$  a resistividade do eletrólito intersticial (filtrado da lama) e  $\rho_{cs} = 1/\sigma_{cs}$  a resistividade (condutividade) equivalente dos sólidos de sua matriz. A grandeza  $\phi_e$  é a porosidade efetiva do arenito e  $\delta_c$  um parâmetro característico do tipo de argila presente na matriz da formação. As constantes  $\alpha_o$ ,  $m$  e  $q$  são determinadas empiricamente. As equações (3) e (4) foram usadas para computar distribuições de porosidade efetiva e de permeabilidade intrínseca dos arenitos ao longo dos dois furos. A condutividade da matriz ( $\sigma_{cs}$ ) foi determinada adotando uma estrutura de grãos de areia capeados por folhelhos, com proporção dada pela argilosidade calculada dos perfis de radiação gama conforme proposto por Lima e Sharma (1992).

Os perfis sônicos compensados vêm mostrados nas segundas faixas da direita, ao lado dos perfis elétricos (Figs. 2 e 3). Eles representam o tempo médio de propagação ( $\Delta t$ ) ao longo de 1,0 pés de formação penetrada pelo som emitido de um transmissor na sonda. Nos trechos mais regulares dos dois perfis os dados de  $\Delta t$  permitiram computar valores confiáveis de porosidade total dos arenitos usando a fórmula do tempo médio (Wyllie et al., 1956) dada por

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_m - \Delta t_f} \times \frac{1}{B_{cp}}, \quad (5)$$

onde  $\Delta t$  é o tempo lido em cada ponto do perfil,  $\Delta t_m$  o tempo de transito da onda P na matriz sólida da rocha ( $\Delta t_m = 55$  ms/pé para arenitos quartzosos),  $\Delta t_f$  o tempo de transito no fluido dos poros ( $\Delta t_f = 189$  ms/pé para água doce) e  $B_{cp}$  é um fator de correção para a compactação do pacote. O valor de  $B_{cp}$  é estimado do tempo de propagação observado nos horizontes argilosos da seção (Schlumberger, 1989).

Assim, do perfil de radiação gama, foi possível demarcar horizontes contendo argilas, ao longo das seções colunares dos poços MO-02 e PE-01. Além disso, foi possível constatar que o pacote arenoso que se estende de 82 a 230m de profundidade no poço MO-01 e de 0 a 143 m no poço PE-01, corresponde ao trecho mais limpo e uniforme das duas seções. O pacote argilo-arenoso do topo da coluna de MO-01, com 20 m de espessura, mostra um crescimento, da base para o topo, na argilosidade da formação. Esse intervalo não é reconhecido no poço PE-01. Nos intervalos de profundidade entre 240 e 280m, em MO-01 e de 190 – 230m, em PE-01, ocorrem arenitos argilosos finos e mal selecionados, intercalados

com folhelhos e siltitos avermelhados. Níveis argilosos esporádicos ocorrem ao longo de todo o pacote Urucuia.

Os valores de resistividade aparente, nas primeiras faixas da direita, mostram que as leituras da ferramenta IEL, de maior raio de investigação, são muito elevados, indicando que a maior parte do Grupo Urucuia é muito resistiva. Deflexões geradas por horizontes mais condutivos distribuídos entre 25 e 85 m de profundidade, em MO-01, e entre 30 – 56 m, em PE-01, parecem representar zonas alternadas de arenitos friáveis com níveis arenosos muito silicificados. Essas zonas possuem baixa argilosidade e se associam a intervalos de intensas irregulares nas paredes do furo, conforme se infere do comportamento dos perfis sônicos mostrados nas segundas faixas da direita nas Figuras 2 e 3. Os dados de SP e de resistividade SN são menos diagnósticos, dada às resistividades relativamente elevadas dos arenitos, mas, qualitativamente, apontam para a mesma variação de composição descrita.

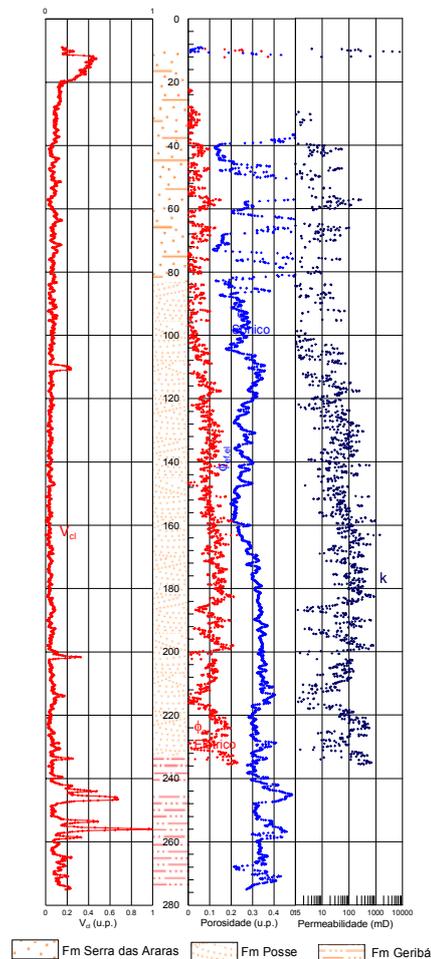
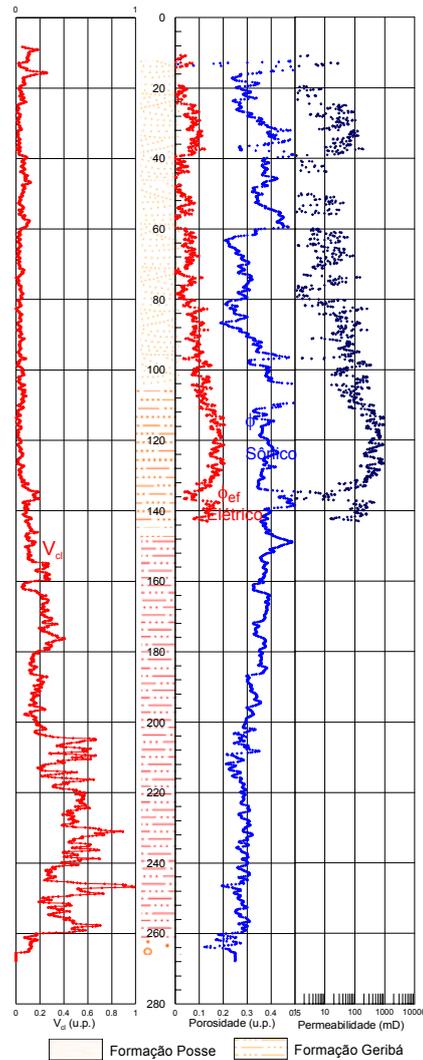


Figura 4 – Parâmetros petrofísicos dos arenitos do Grupo Urucuia estimado dos perfis geofísicos do poço MO-02.



*Figura 5 – Parâmetros petrofísicos dos arenitos do Grupo Urucua estimado dos perfis geofísicos do poço PE-01.*

Os resultados petrofísicos de porosidade total ( $\phi$ ), porosidade efetiva ( $\phi_e$ ), argilosidade ( $V_{cl}$ ) e permeabilidade ( $k$ ) estão mostrados nos gráficos das Figuras 4 e 5. A porosidade total varia de 25 a 35% nos intervalos arenosos mais limpos, podendo alcançar até 40% nos trechos com argilas disseminadas e mais de 50% nos horizontes dominados por argilas. A porosidade efetiva, computada dos dados elétricos, é válida apenas para os intervalos areno-argilosos, e varia entre 20 e 25% na maior parte da seção. Os intervalos de granulometria mais fina e de melhor seleção tem porosidades efetivas maiores (cerca de 5%) do que àquelas de grãos mais grosseiros e de menor seleção.

Integrando os dados geofísicos observados nos poços MO-02 e PE-01, com os parâmetros petrofísicos deles computados, foi possível verificar que, efetivamente, o Grupo

Urucuia na bacia do São Francisco, é constituído por três fácies geofísicos distintos, cada um deles constituindo uma formação geológica de características litológicas específicas assim definidas:

- (i) **Facies Superior (Formação Serra das Araras)** – Presente nos dois poços está mais bem caracterizada no perfil do poço MO-02. Corresponde a uma sucessão de arenitos avermelhados, de granulação média a fina, friáveis, argilosos e estratificados em bancos de 2 a 4 m de espessura, nos quais, geralmente, o teor de argila aumenta da base para o topo do banco. É comum a presença de níveis silicificados intercalados, identificados por fortes crescimentos na resistividade ILD e por anomalias distintas nas curvas de velocidade sônica. Alcança uma espessura de 82 m em MO-02 e possui, no topo, uma camada guia de alta argilosidade e aproximadamente 20 m de espessura. Essa camada superior de maior condutividade foi reconhecida em quase todas as sondagens elétricas realizadas na área. Esta unidade se separa do facies intermediário por meio de uma superfície erosiva definida em termos dos contrastes físicos manifestados nos perfis radioativos, elétricos e sônico.
- (ii) **Facies Intermediário (Formação Posse)** – Identificado nos dois poços, alcança uma espessura aproximada de 130 m. Compõe-se de arenitos rosa-acinzentados, de granulação média a fina, com proporção de argila bem menor que a do facies superior (<10%). Localmente, pode conter horizontes com argilosidade um pouco mais alta (15 a 30%). Pode se identificado pelo empilhamento de corpos arenosos com algumas dezenas de metros de espessura. A porosidade efetiva ao longo da seção varia de 8 a 22%, enquanto a permeabilidade oscila entre menos de 100 a um pouco mais de 1,0 Darcy.
- (iii) **Facies Inferior (Formação Geribá)** - Parcialmente penetrado pelos dois poços, tem espessura mínima de 110 m. Compõe-se de arenitos argilosos (15 a 30% de argilas), de granulação fina, com intercalações delgadas de horizontes argilosos avermelhados. Estes gradam, em direção a base da seção, para espessos argilitos ou folhelhos (com 60 a 100% de argilas) marrom-avermelhados, contendo intercalações de arenitos finos e siltitos. Na base de PE-01 foi identificado um nível conglomerático de matriz areno-argilosa fina contendo seixos de quartzo, silixitos e carbonatos. Faz contato transicional com o facies intermediário, conforme indicado pelas propriedades físicas medidas nos furos. Essa zona de

transição tem cerca de 20m de espessura e, através dela, tanto a porosidade quanto a permeabilidade passam por valores bem pequenos (Figs. 4 e 5).

Com o fim de dar suporte à interpretação dos dados gravimétricos, as densidades médias em massa das formações definidas acima foram computadas a partir dos dados de porosidade efetiva usando a expressão

$$\mu_o = \mu_s + \phi_e(\mu_s - \mu_w), \quad (6)$$

onde,  $\mu_o$  é a densidade saturada da formação,  $\mu_s$  a densidade média dos componentes sólidos ( para quartzo  $\mu_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ ) e  $\mu_w$  a densidade da água de saturação ( $\mu_w = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ). Os valores médios ponderados encontrados para a seqüência do Grupo Urucua nos dois poços foram: (i)  $\mu_o^U = 2,56 \text{ g/cm}^3$  (Poço MO-02); (ii)  $\mu_o^U = 2,54 \text{ g/cm}^3$  (poço PE-01).

Os dados litológicos e hídricos levantados neste projeto indicam que os arenitos do Grupo Urucua não obedecem à lei de Archie (Archie, 1942),

$$\rho_o = \rho_w \phi_e^{-m}, \quad (7)$$

na qual  $\rho_o$  e  $\rho_w$  são as resistividades da formação e de sua água de saturação,  $\phi_e$  é a porosidade efetiva e  $m$  é uma constante empírica, referida como índice de cimentação. A razão  $\rho_o / \rho_w = F = \phi_e^{-m}$ , Archie denominou de fator de resistividade da formação.

Os dados petrofísicos computados para o poço MO-2 podem ser usados na verificação de tal afirmação. Tomando  $m = 1,8$  (valor típico para arenitos de grãos arredondados a subarredondados) e os valores estimados da porosidade sônica na parte mais limpa do perfil, se obtém  $F$  variando de 7,7 a 22, ao longo do furo. Com  $\rho_w = 1.560 \text{ ohm.m}$ , conforme medido em amostra de água coletada do poço se tem que a resistividade do aquífero deveria variar entre 12.000 a 34.000 ohm.m. Entretanto o valor médio de  $\rho_o$  inferido de uma sondagem elétrica vizinha a MO-02 é de apenas 2.600 ohm.m. Assim, o grau de dissolução da água e a presença de argila tornam a relação  $\rho_o - \rho_w$  não-linear, diferentemente da lei de Archie. Isso faz com que a água na formação pareça ser mais condutora do que realmente ela é. Uma alternativa viável é a de modificar a expressão de Archie para

$$\rho_o = \rho_{we} \phi_e^{-m}, \quad (8)$$

com a introdução de uma resistividade equivalente para a água,  $\rho_{we}$ , quando em contato com os poros das formações. Essa resistividade  $\rho_{we}$  varia de forma não-linear com  $\rho_w$  (por

exemplo,  $\rho_{we} = a\rho_w^\alpha$ ). Diversos trabalhos têm demonstrado a validade prática dessa transformação (Lima e Nery, 1999; Lima et al., 2005). Conhecida a relação  $\rho_{we} - \rho_w$  de uma dada formação, a equação (7) poder ser usada para estimar a variabilidade espacial de  $\phi_e$  a partir da resistividade do aquífero determinada via sondagens elétricas verticais.

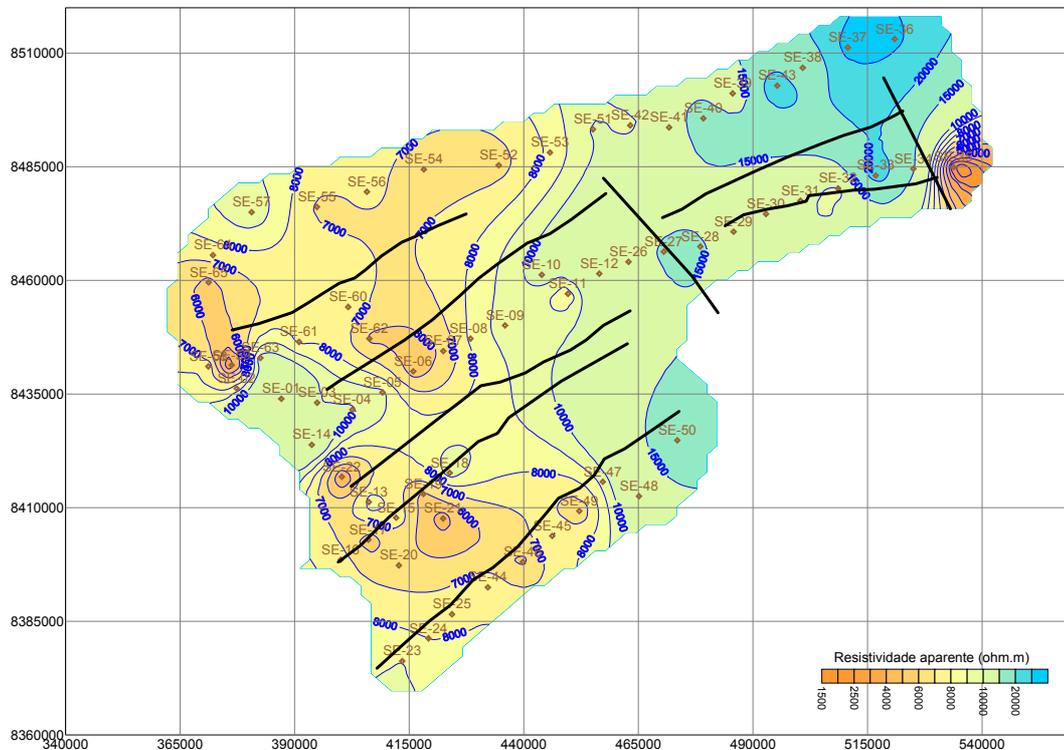
### 3. CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA

A condução de eletricidade nas rochas da crosta terrestre é basicamente determinada pelo conteúdo e salinidade dos eletrólitos aquosos normalmente nelas presentes, pelo volume total e conectividade dos espaços vazios, expressos em termos de suas porosidades efetivas, e pela proporção de minerais possuidores de uma condutividade elétrica superficial, dispersos em suas matrizes sólidas. Por causa da possibilidade concreta de se poder discriminar e determinar esses elementos, os métodos geofísicos elétricos têm tido amplos sucessos em hidrogeologia e em estudos de poluição ambiental (Ward, 1990; Meju et al., 1999, 1997; Pereira e Lima, 2007).

Os equipamentos utilizados nas aquisições dos dados geoeletricos no campo foram os sistemas SYSCAL R-2 e SYSCAL-PRO, ambos fabricados pela Iris Instruments, de propriedade do CPGG/UFBA. Esses sistemas são alimentados por baterias comuns de 12V acopladas a conversores de voltagem DC-DC. Operam com correntes contínuas, medindo simultaneamente a resistividade e a polarizabilidade aparentes do subsolo. As tensões máximas de saída desses sistemas podem atingir, respectivamente 800V e 1.000V, sob potência de 250W. Como eletrodos de corrente e de potencial foram usadas barras metálicas de aço revestidas com cobre, enterradas no solo, ligadas aos sistemas por cabos condutores isolados de baixa resistência específica. Para reduzir os efeitos de maus contatos entre os eletrodos e a terra, os buracos de aterramentos foram sempre molhados com água salgada.

Sessenta e cinco centros de sondagens elétricas verticais foram distribuídos na área da bacia com o objetivo de auxiliar na caracterização estratigráfica e estrutural do sistema aquífero Urucuia. O arranjo de eletrodos utilizado em campo foi o de Schlumberger, expandido até um espaçamento AB/2 máximo de 1.000 m. Essa amostragem geofísica foi estabelecida ao longo de rodovias principais e secundárias da área, com uma distribuição espacial suficiente para poder representar os resultados em termos de mapas e em, pelo

menos, cinco perfis geológicos transversais (Fig. 1). Algumas dessas sondagens foram locadas próximas a poços de produção de água, para servirem de base na redução da ambigüidade da interpretação geolétrica final.

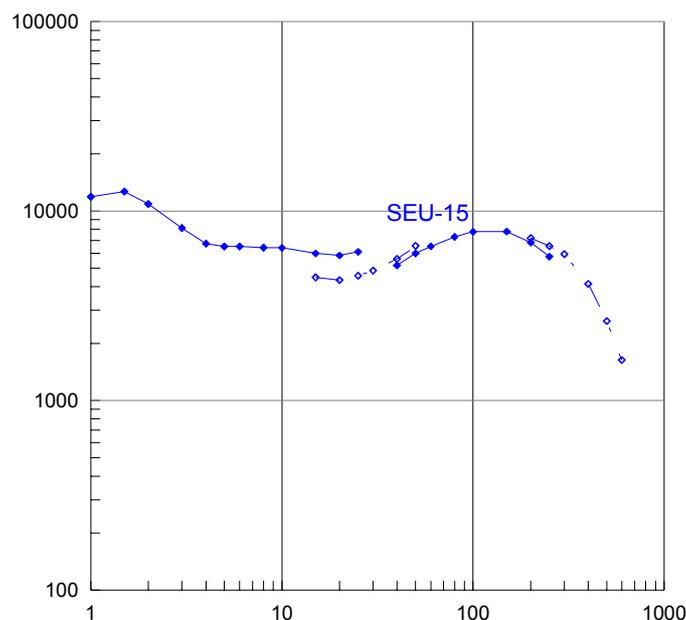


*Figura 6 – Mapa da função resistividade aparente observada com espaçamento AB/2 de 100 m. As linhas pretas identificam alguns dos lineamentos estruturais da Figura 1.*

A Figura 6 é um mapa que mostra a variação espacial da função resistividade aparente observada na área estudada, para espaçamentos de corrente AB/2 de 100m, o que reflete uma profundidade de investigação próxima de 50 m. Os valores de  $\rho_a$ , em geral, são muito elevados (acima de 2.000 ohm.m), indicando um subsolo de constituição arenosa, total ou parcialmente saturado com água de baixa salinidade. A resistividade cresce de modo regular de leste para oeste, principalmente em função do aprofundamento do nível freático do aquífero, no sentido indicado. Além disso, a existência de zonas com contornos fechados de iso-resistividades sugerem a presença de fortes contrastes elétricos laterais, possivelmente relacionados a estruturas regionais de blocos falhados. As linhas pretas na Figura 6 representam algumas das principais estruturas lineares demarcadas no mapa da Figura 1 e

interpretadas como possíveis zonas de falhas. Portanto, mesmo da função  $\rho_a$  bruta, é possível extrair informações qualitativas sobre variações litológicas, de conteúdo de água ou da presença de zonas locais de intensas variações laterais.

**3.1 Processamento e Interpretação dos Dados** - Praticamente todas as sondagens elétricas efetuadas na área apresentam comportamento regular e suave, compatível com modelos estratificados de camadas subhorizontais. Todavia, devido a variações laterais na resistência de contato com os solos subsaturados em água, algumas dessas curvas apresentam fortes deslocamentos de ramos quando da mudança dos eletrodos de potencial M e N, conforme representado na Figura 7. Para essas situações, foi aplicado um processamento de redução, de modo a deslocar numericamente os ramos afetados por quantidades constantes, conforme se mostra na Figura 8.



*Figura 6 – Dados observados nos três ramos da curva da sondagem elétrica SEU-15.*

Todas as sondagens elétricas executadas foram invertidas unidimensionalmente usando os softwares: (i) RES1D da Geotomo Softwares, para compor modelos estruturais iniciais a serem submetidos à inversão; (ii) RESIST 1.0, programa de domínio público elaborado por Vander Velper (1988) para efetuar a inversão não-linear por mínimos

quadráticos. Alguns dos resultados práticos obtidos são discutidos na seção que se segue, enquanto àqueles relativos a todas as sondagens são mostrados no Apêndice 1.

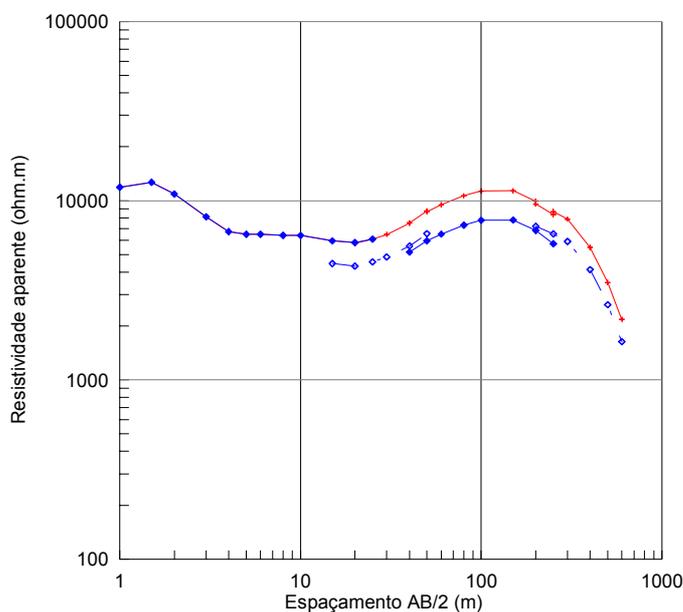


Figura 7 – Dados corrigidos por suavização numérica da sondagem elétrica SEU-15.

**3.2 Resultados Geométricos** - A maioria das curvas de sondagens obtidas tem a forma de uma dupla de colinas com uma depressão central refletindo, basicamente, as variações litológicas no Grupo Urucuiá. As colinas correspondem a pacotes arenosos mais limpos sendo a primeira, geralmente representante da zona não-saturada do aquífero. A depressão central se deve a uma redução na resistividade do aquífero, associada a um aumento na argilosidade característico da Formação Serra das Araras. Quase todas as sondagens apresentam ramos terminais descendentes indicando a existência de um pacote regional muito mais condutor, interpretado como a Formação Geribá, suportando os pacotes mais arenosos.

As figuras 8 e 9 contêm gráficos representativos de algumas das sondagens elétricas invertidas unidimensionalmente usando os procedimentos computacionais mencionados (Vozoff, 1958; Koefoed, 1979). Em geral, apesar dos contrastes de resistividade elevados entre os diferentes horizontes da subsuperfície, as inversões foram satisfatórias em função do uso das informações de controle disponíveis. Nas sondagens paramétricas, os dados de  $\rho_a$  foram ajustados, com erros médios quadráticos inferiores a 2%, se fixando a profundidade do nível freático e se ajustando os valores de resistividade das camadas até um limite de erro prefixado de 1%. Os dados observados (símbolos coloridos nos gráficos) se ajustam com

muito boa precisão as curvas teóricas computadas para os modelos geoeletricos interpretados (curvas cheias). Os modelos finais para todas as sondagens realizadas, em termos de colunas verticais de resistividade versus profundidade, estão agrupados no documento Apêndice 1.

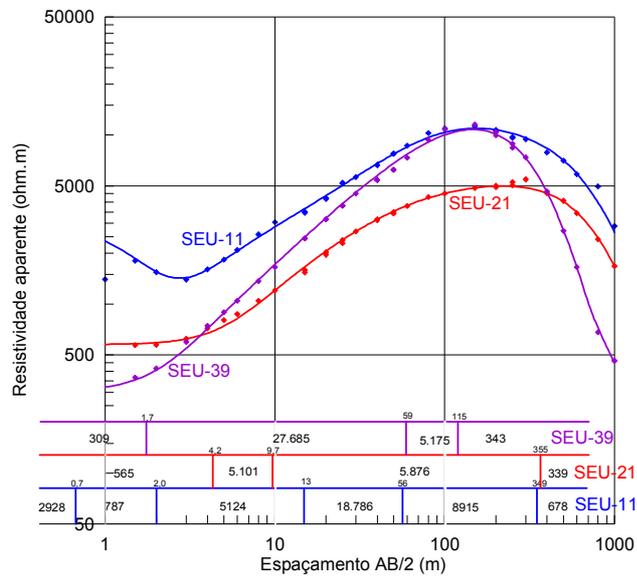


Figura 8 – Exemplos de curvas de SEVs típicas da área e modelos interpretados.

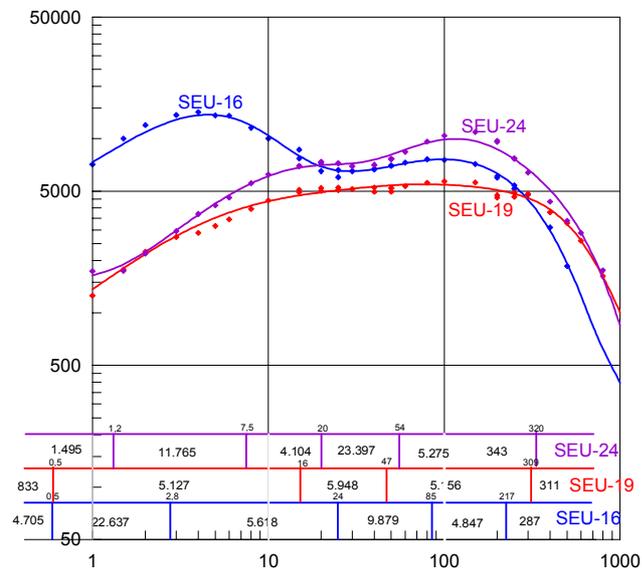


Figura 9 – Exemplos de curvas de SEVs típicas da área e modelos finais interpretados.

Cinco seções geoeletricas transversais formadas por SEVs, equidistantes em média de 8 km, foram construídas para representar a estrutura geológica da área. As figuras 10 e 11 mostram as seções transversais A - A' e B - B', construídas, respectivamente, com 9 e 10 SEVs obtidas ao longo da rodovia Posse - Correntina orientada, praticamente, de sudoeste para nordeste-leste. As duas seções combinadas mostram que a seqüência arenosa superior do Grupo Urucuia, é bem delgada no extremo leste do perfil, mas se espessa progressivamente em direção oeste, podendo alcançar, próximo à escarpa da Serra Geral, mais de 500 m de espessura. O substrato do sistema aquífero é invariavelmente representado como um pacote muito condutor que, por controle dos dados dos poços MO-02 e PE-01, é interpretado corresponder a seqüência argilosa da Formação Geribá. Nas seções da metade da área para leste (Figs. 11 e 12), este pacote condutor repousa sobre litologias mais resistentes, interpretadas como carbonatos do Grupo Bambuí.

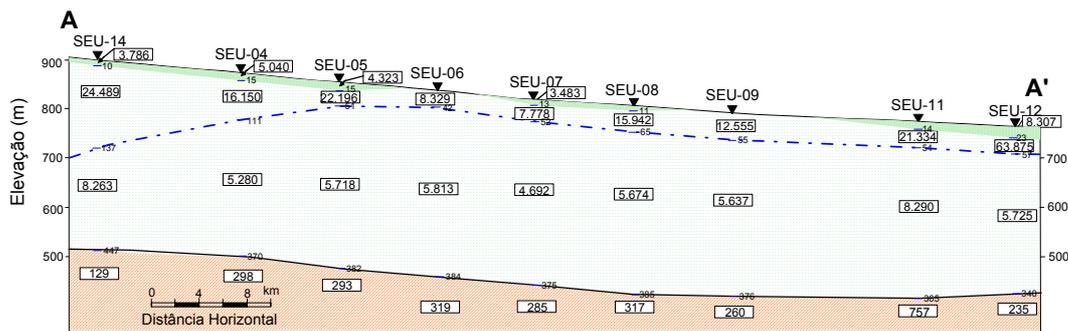


Figura 10 – Seção geológica transversal A – A' construída com base nos dados das sondagens elétricas indicadas.

Uma expressão da estrutura transversal do sistema Urucuia está mostrada na figura 13, construída usando dados de oito SEVs. A seção cruza através da parte oeste da sub-bacia, onde o pacote arenoso atinge as maiores espessuras. Nesse caso, ao invés de uma estrutura uniformemente inclinada, aparecem duas grandes falhas com deslocamentos diferenciais estimados em 100 a 300 m, ao longo da seção. Essas falhas delimitam um “graben” ao longo do qual o pacote condutor e o substrato do Grupo Urucuia foram correspondentemente soerguidos.

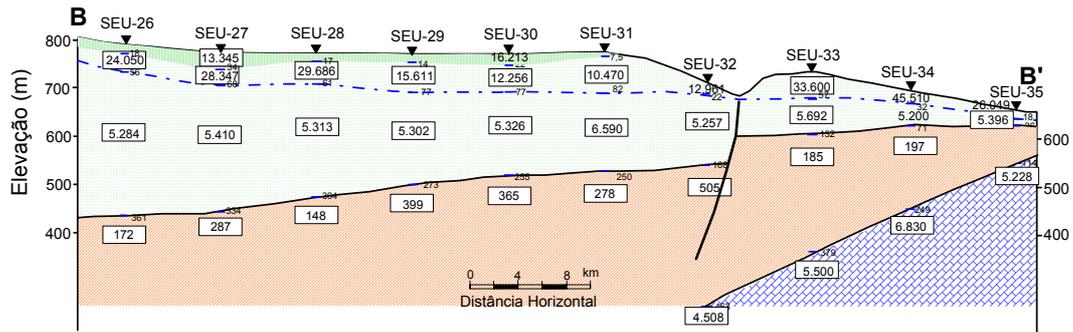


Figura 11 – Seção geológica transversal B – B' construída com base nos dados das sondagens elétricas indicadas.

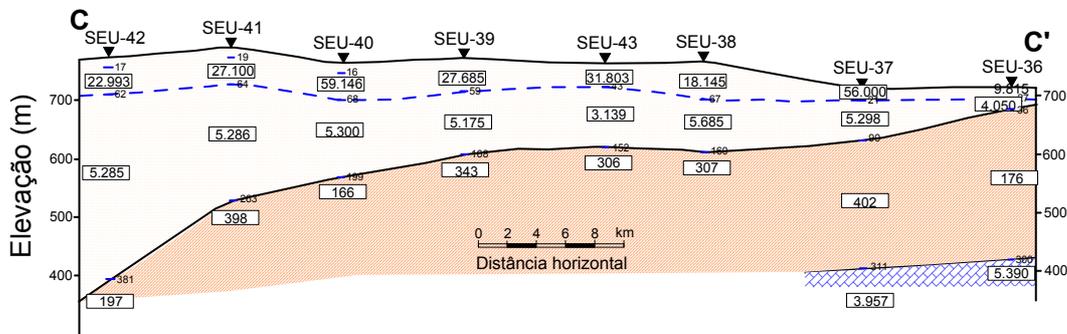


Figura 12 – Seção geológica transversal C – C' construída com base nos dados das sondagens elétricas indicadas.

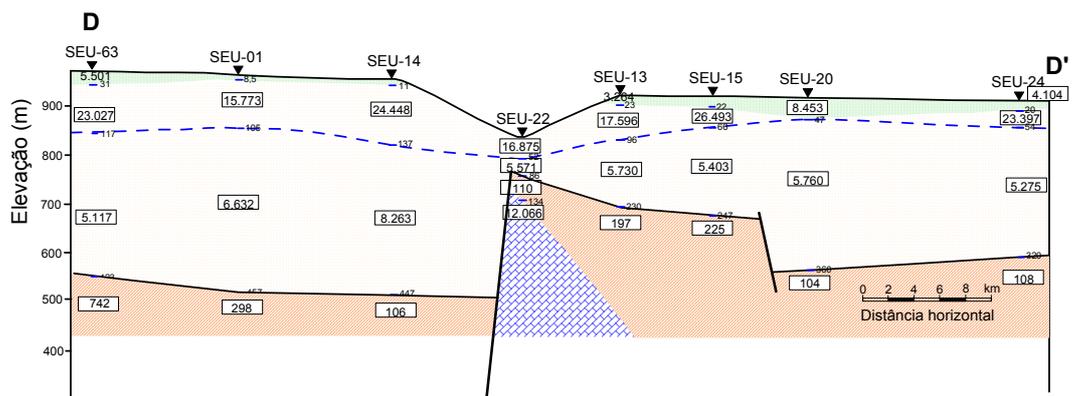


Figura 13 – Seção geológica transversal D – D' construída com base nos dados das sondagens elétricas indicadas.

Em todas as seções construídas se observa que o nível estático das águas subterrâneas varia de menos de 20m nas proximidades dos vales, a mais de 180m próximo a Serra Geral, em estreita relação com a topografia do terreno. Tal comportamento, atesta um caráter regional não-confinado para o sistema aquífero. Ainda como aspectos hidrológicos importantes destacam-se: (i) as resistividades elevadas das camadas, em função do caráter muito doce de suas águas (salinidades menores que 200 mg/l, em geral); (ii) a espessa zona vadosa do sistema na parte mais alta do chapadão, que protege suas águas da evapotranspiração; (iii) a presença de um divisor interno no fluxo subterrâneo na bacia em posição diferente da do divisor das águas superficiais (Figs. 10 e 14).

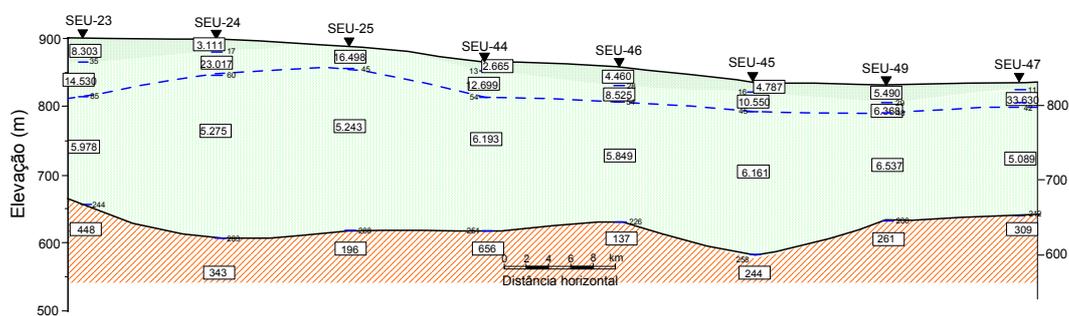


Figura 14 – Seção geológica transversal E – E' construída com base nos dados das sondagens elétricas indicadas.

A disposição espacial da superfície freática do aquífero está representada em mapa constante do relatório de Hidrogeologia. Ele foi construído com base em dados de poços, das sondagens elétricas verticais e dos padrões de afloramento da mesma nas drenagens. As linhas equipotenciais hidráulicas indicam haver, na área estudada, um forte relacionamento entre os fluxos superficial e subterrâneo. Todavia, se destaca a presença de uma zona de divergência, orientada praticamente de norte para sul dividindo o fluxo subterrâneo nas sub-bacia em duas partes: (i) uma, de maior extensão, na qual o fluxo ocorre de oeste para leste, em concordância com a drenagem superficial; (ii) outra, na qual o fluxo se processa em direção a Serra Geral dirigindo as águas subterrâneas para o estado de Goiás.

O mapa da Figura 15 ilustra a configuração da topografia do substrato condutivo do sistema aquífero (topo da Formação Geribá). Ele define a orientação estrutural de uma extensa rampa de caimento geral para ENE, acompanhando o caimento da superfície topográfica, perturbada por deslocamentos subverticais ao longo de falhas regionais, numa

estrutura de blocos falhados. É inferido que este pacote condutor atue como uma base impermeável para o aquífero.

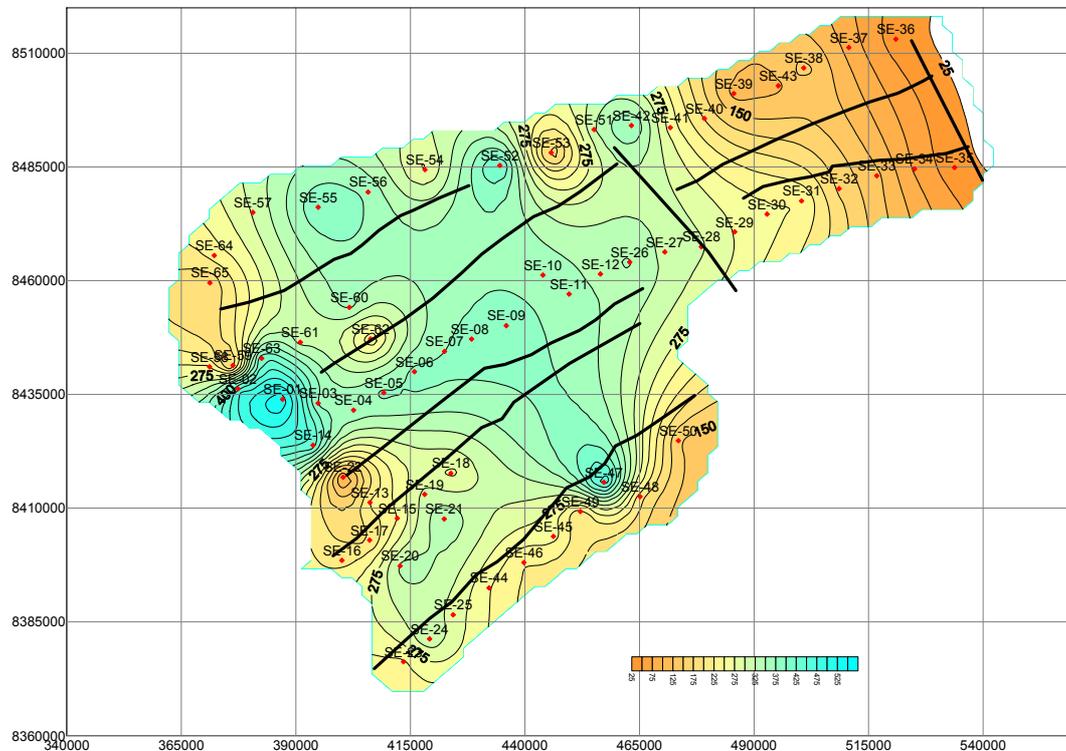


Figura 14 – Mapa de contorno da profundidade do substrato condutor na área das sub-bacias estudadas. As linhas pretas indicam alguns dos lineamentos da Figura 1.

#### 4. CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA

O estado da Bahia já foi objeto de vários levantamentos gravimétricos regionais conduzidos por diferentes organismos, tais como os da Petrobrás nas bacias do Recôncavo-Tucano-Jatobá (Petrobrás, 1969; 1970), e CPRM e IAG/USP em grandes áreas do estado (Molina et al, 1979; Gomes e Mota, 1980). O Observatório Nacional (ON) também tem realizado medidas gravimétricas absolutas para compor a rede nacional de estações gravimétricas (RENEGA). Algumas das estações da RENEGA estão sendo utilizadas para calibração do levantamento enfocado. Em adição, nos termos do contrato firmado, a CPRM transferiu para o CPGG/UFBA um Relatório Diagnóstico do Estado da Arte para a área do projeto, cujos dados foram úteis para avaliar o conhecimento geofísico da área e planejar a estratégia de execução dos trabalhos de campo (CPRM, 2006).

Este projeto incluiu realização de um amplo levantamento gravimétrico regional objetivando auxiliar na análise da estrutura geológica do Aquífero Urucua e de seu substrato, na área do entorno das sub-bacias estudadas. Este levantamento foi realizado conjuntamente com um levantamento geodésico usando GPSs diferenciais, para precisa definição das coordenadas geográficas das estações de medição. No total foram levantadas 565 estações, conforme ilustrado no mapa da figura 15. Os dados gravimétricos foram obtidos com uso de dois gravímetros Lacoste-Roberg, um cedido e operado no campo por técnico do Observatório Nacional/CNPq e outro cedido e operado por técnico do Centro de Geociências da UFPA, e um gravímetro Scintrex de propriedade do CPGG/UFBA.

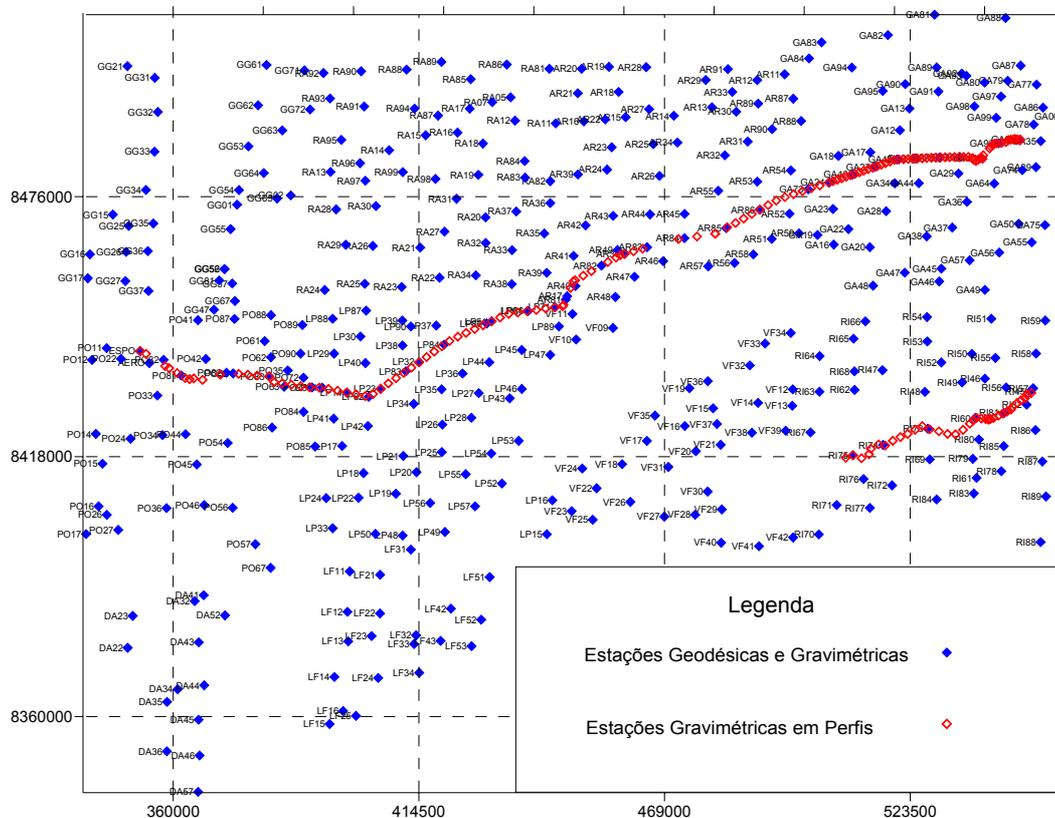


Figura 15 – Mapa mostrando a distribuição das estações gravimétricas e geodésicas levantadas na área do projeto.

Nesta seção são discutidos os resultados dos levantamentos plani-altimétricos e gravimétricos realizados na área de estudo, o processamento numérico de redução e a representação cartográfica dos dados adquiridos, assim como uma interpretação semi-quantitativa dos resultados gravimétricos, na forma de mapas e de perfis.

**4.1 Metodologia de Trabalho** - Os trabalhos referentes ao levantamento proposto foram efetivamente iniciados em Fevereiro de 2006. O levantamento completo envolveu um total de 85 dias de trabalho de campo, com pelo menos duas equipes trabalhando simultaneamente. A área do projeto foi subdividida em 10 quadrículas de  $\frac{1}{2}$  grau de lado referidas, no mapeamento do IBGE na escala de 1:100.000, pelas seguintes denominações: Guarani de Goiás, Rio Arrojado, Arrojolândia, Gatos, Posse, Lagoa do Pratudão, Vereda Funda, Rio Itaquari, Damianópolis e Lagoa do Formoso. Dentro de cada uma delas se estabeleceu o número médio de 50 estações de geodésia e gravimetria, regularmente equiespaçadas cerca de 8 km entre si. O planejamento do trabalho de campo, em termos das estradas de todos os tipos a serem percorridas, drenagens, fazendas, vilas e cidades locais de pernoite, assim como todas as estações de referência disponíveis na área, foi configurado nos mapas planimétricos na escala de 1:100.000 do IBGE, que constam do CDROM anexo ao presente relatório. Para orientar a navegação e fixar as estações nos trabalhos de campo foi usado um “notebook” com o pacote “Google Earth”. O sistema de referências adotado para todo o levantamento geodésico foi o WGS-84. O trabalho ora analisado, leva em conta informações de 565 estações adquiridas com os gravímetros do ON, na primeira campanha, do CPGG/UFBA nas primeira e segunda campanhas, e com o da UFPA na terceira campanha, respectivamente.

**4.2 Processamento e Redução dos Dados** - O posicionamento em campo das estações de levantamento foi efetuado com GPSs diferenciais usando transferência geodésica de estações complementares a partir de marcos de referência do IBGE referidos como SAT-93080, SAT-91655 e SAT-93168. Foram normalmente utilizados dois equipamentos GPSs, sendo um fixado numa estação da rede altimétrica do IBGE ou numa estação fixa transferida para cada quadrícula, e um móvel, ao longo dos caminhamentos. Foram usadas leituras contínuas com 20 – 30 minutos de amostragem temporal dos sinais de satélites em cada estação, de modo que as precisões planimétrica e altimétrica alcançadas foram melhores do que 5 m nas coordenadas geográficas, e 10cm na altitude elipsoidal.

Na coleta de dados GPS foram utilizadas as técnicas estática e “*stop and go*”, a primeira nas determinações de estações de apoio, e a segunda nas demais estações. Como o relevo, na maior parte da área, é aplainado e a cobertura vegetal é rala, isso favorece a aplicação da segunda técnica, com ganhos efetivos no tempo de rastreamento dos satélites. Diariamente, os dados adquiridos foram pré-processados (correção diferencial), de modo a garantir a qualidade dos dados durante o processamento final.

Os dados dos registros automáticos obtidos com os GPSs diferenciais foram devidamente processados, usando os “softwares” comerciais de ajuste Track-maker e Ashtech Solutions, pelos executores dos serviços especializados, devidamente contratados. Os dados de registro e os resultados plani-altimétricos computados nas três campanhas de campo estão especificados nas planilhas elaboradas para cada uma das quadriculas do levantamento considerado.

Para converter os dados altimétricos referidos ao elipsóide WGS-84, para altitudes ortométricas ou geoidais foi utilizado o seguinte procedimento. Através do aplicativo MAPGEO-2004, desenvolvido pelo IBGE, se calculou o valor da ondulação geoidal (N) de cada estação de medição. A altitude geoidal (H) de cada estação foi então calculada pela expressão  $H = h - N$ , com h sendo a altitude elipsoidal. As altitudes finais obtidas podem ter variações de  $\pm 1,0$  m, de acordo com a precisão do mapa geoidal construído pelo IBGE em torno da área do projeto.

Na aquisição dos dados gravimétricos foram utilizadas as estações de Santana e de Santa Maria da Vitória, que fazem parte da Rede Gravimétrica Brasileira e as de Correntina e Posse, transferidas pelo CPGG/UFBA utilizando, nas operações de transferência, três ocupações intermediárias em períodos de tempo de menos de 12 horas. Dessa forma, a precisão geral dos dados adquiridos é superior a 0,1 mgal.

As leituras gravimétricas com o sistema CG3M foram realizadas com 120 medidas a cada segundo, com atualização de média e desvio padrão a cada 12 medidas. O equipamento efetua automaticamente as correções de deriva, de maré e de inclinação das bolhas de nível X e Y. Os valores de gravidade observados em cada estação com o Lacoste-Romberg foram inicialmente corrigidos das seguintes variações sistemáticas e temporais: constante de calibração instrumental, altura da base do instrumento, derivas estáticas e dinâmicas, e efeitos das marés terrestres. Os dados gravimétricos obtidos com o equipamento da UFPA foram corrigidos com a constante de calibração e os efeitos de deriva. A correção de maré foi realizada com programa desenvolvido pelo geofísico José Gouvêa Luiz da UFPA. Os dados da gravidade absoluta em cada estação levantada também constam das planilhas constantes do CDRom anexo. No cálculo da anomalia Bouguer foram incluídas as correções da gravidade teórica local, e as variações de ar livre e da placa Bouguer, usando um valor de densidade média estimada para as rochas sedimentares em  $2,56 \text{ g/cm}^3$ .

As correções de latitude, ar-livre e de Bouguer foram aplicadas aos dados medidos de gravidade absoluta para obter valores de gravidade Bouguer através da expressão,

$$g_B = g_A - g_T + c_B, \quad (9)$$

onde,  $g_B$  corresponde ao valor da gravidade Bouguer,  $g_A$  é o valor medido da gravidade absoluta,  $g_T$  representa a gravidade teórica na mesma latitude  $\varphi$  em radianos, e  $c_B$  representa as correções de ar-livre (que leva em conta as diferenças de elevação entre as estações) e de Bouguer (que inclui as atrações do material geológico entre as estações e o geóide), respectivamente. O valor da gravidade teórica é calculado pela seguinte equação

$$g_T = 978031,85(1 + 0,005278895\text{sen}^2\varphi + 0,000023462\text{sen}^4\varphi), \quad (10)$$

enquanto o fator combinado de correção  $c_B$  é dado por

$$c_B = (0,3086 - 2,56 \times 0,04185)H, \quad (11)$$

para pontos situados a uma elevação ortométrica  $H$  e uma cobertura crustal acima do geóide com massa específica de  $2,67\text{g/cm}^3$ .

A correção de terreno é normalmente realizada subdividindo a região em torno de cada estação por pequenos corpos de geometria simples, de modo que se possa calcular facilmente sua atração. Usando os dados altimétricos geoidais foi construído um modelo digital do terreno para a área levantada, o qual foi estatisticamente calibrado usando o pacote Dapple da Geosoft e uma imagem DTM construída com dados de satélites georeferenciados. As correções descritas acima, em sua forma final, foram efetuadas em computador, utilizando o software OASIS MONTAJ v 4.2 licenciado pela Geosoft para o CPGG/UFBA, em conformidade com o Termo de Referência estabelecido pela CPRM para este levantamento (CPRM, 2005). A separação regional residual foi efetuada de duas maneiras. A primeira por redução analítica com um ajuste polinomial gaussiano e a segunda tomando a segunda derivada de  $g$ .

**Resultados Gravimétricos** - Conforme mencionado anteriormente os dados tratados no presente relatório estão distribuídos em dez quadrículas constituintes da área. Destas, seis estão praticamente atendendo ao esquema de distribuição da amostragem programado. Mas em quatro, por dificuldades de acesso, as folhas de Damianópolis (13), Guarani de Goias

(32), Lagoa do Formoso (20) e Vereda Funda (34) ficaram com densidades de amostragem mais baixas.

Os valores absolutos da gravidade observada nas 565 estações da área estão apresentados na forma de um mapa de contorno com imagem a cores na Figura 15. Esses resultados foram computados e representados graficamente usando o software SURFER 8. O mapa das anomalias gravimétricas Bourger construído do mesmo modo, consta da Figura 16. Na re-amostragem e interpolação dos dados das figuras 15 a 18 foi usado o procedimento estatístico da *krigagem* com as opções “default” do programa SURFER, adotando-se uma malha regular de 500 m de separação nas coordenadas horizontais. No processamento final global usando OÁSIS MONTAJ foi efetuada uma análise de dependência espacial mais rigorosa dos dados, com determinação de variogramas para melhor controlar o processo de *krigagem*.

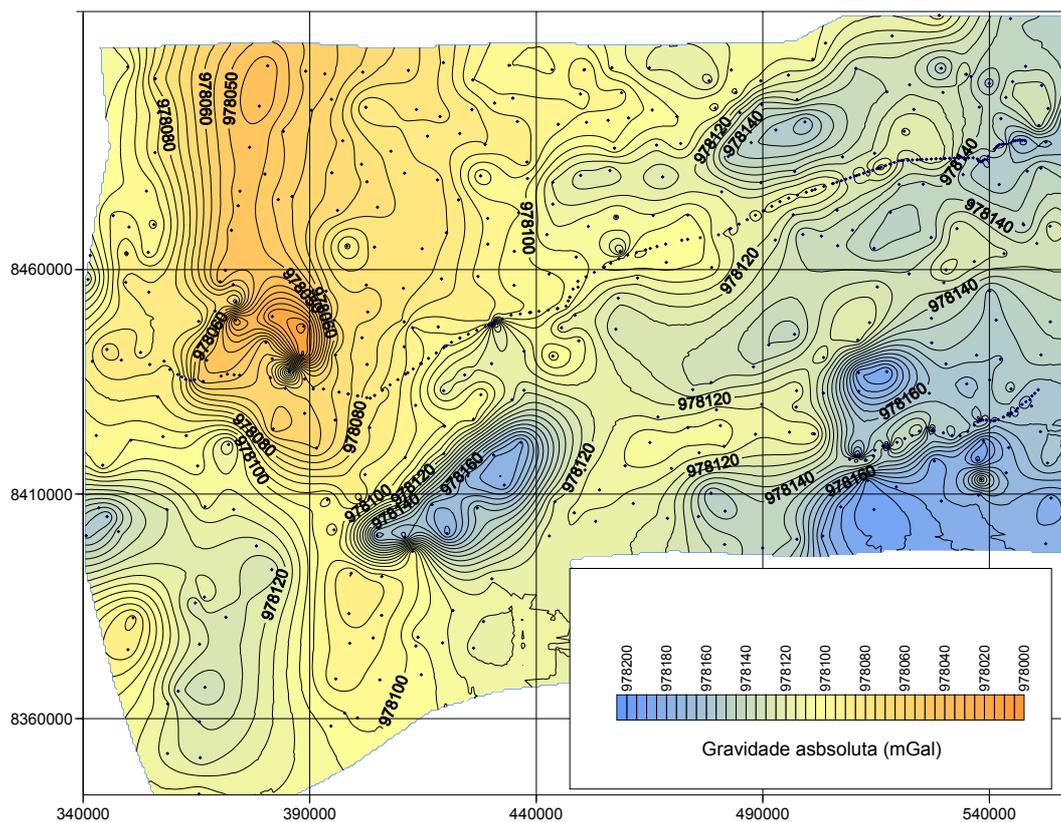
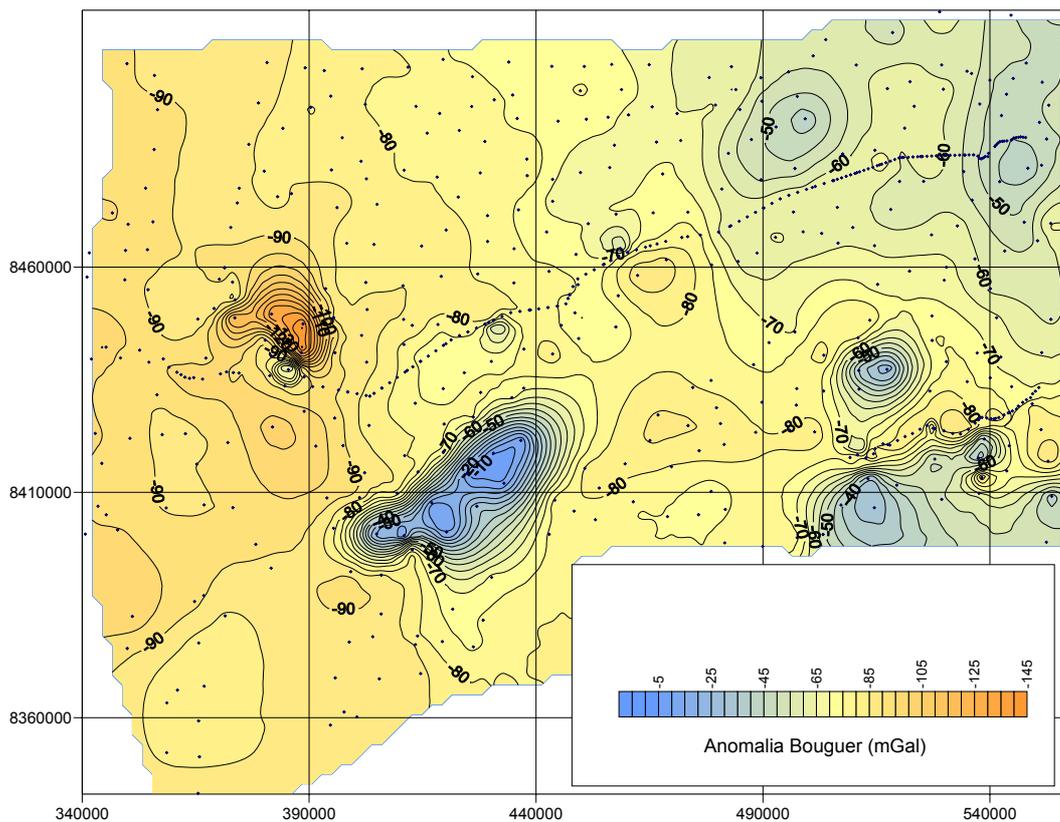


Figura 15 – Mapa de isovalores da gravidade absoluta na área das sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso.

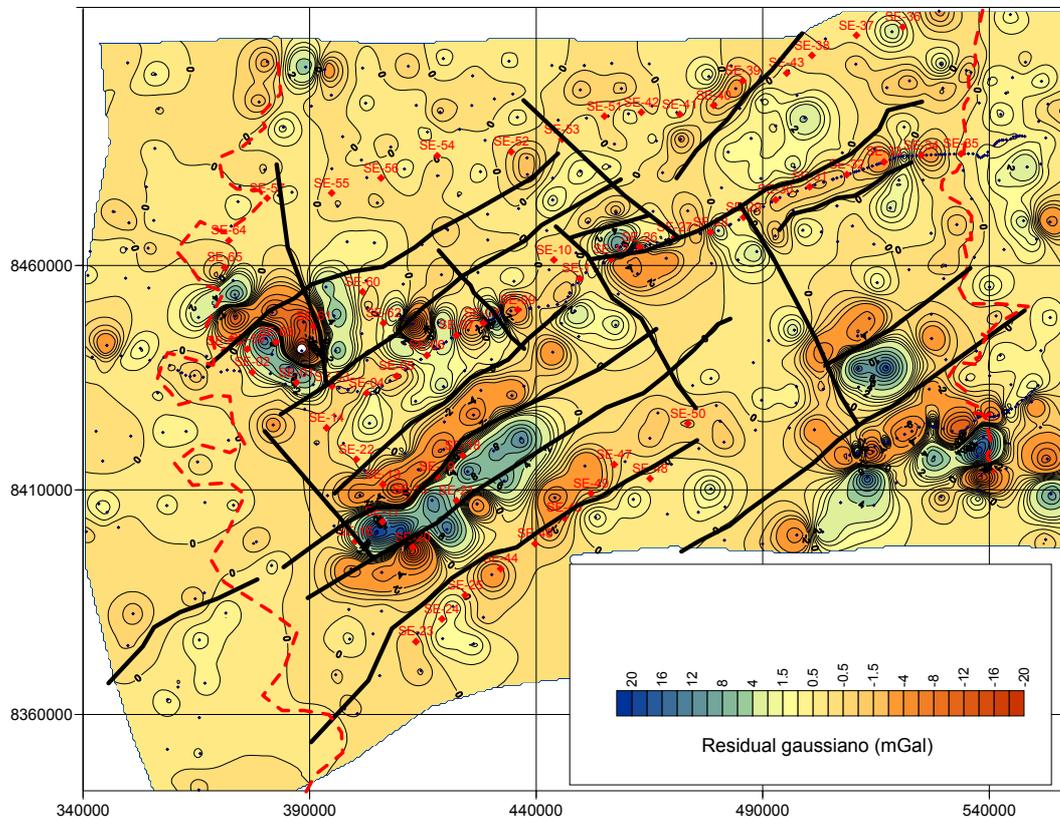
Na Figura 15 se verifica que os valores mais baixos de gravidade ocorrem no setor noroeste do mapa quase que demarcando o limite da Serra Geral de Goiás. Os valores crescem, em geral, de noroeste para sul e sudeste com oscilações locais ligadas a flutuações na profundidade do substrato cristalino mais denso. No mapa de anomalias Bourger (Fig. 16), construído após as correções de ar livre, Bouguer e das irregularidades do terreno, se observa melhor as irregularidades na topografia do embasamento assim como a orientação geral dos principais lineamentos estruturais.



*Figura 16 – Mapa das anomalias gravimétricas Bouguer na área das sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso.*

Nas figuras 17 e 18 estão mostradas as anomalias residuais produzidas pelas rochas e estruturas dominantes nas coberturas sedimentar e meta-sedimentar do embasamento cristalino, cujo efeito foi reduzido supondo um comportamento regional aproximado por um polinômio de primeiro grau. Nesses dois mapas estão demarcados os principais lineamentos do tipo falha, inferidos da geometria das anomalias. Essas feições são melhores demarcadas

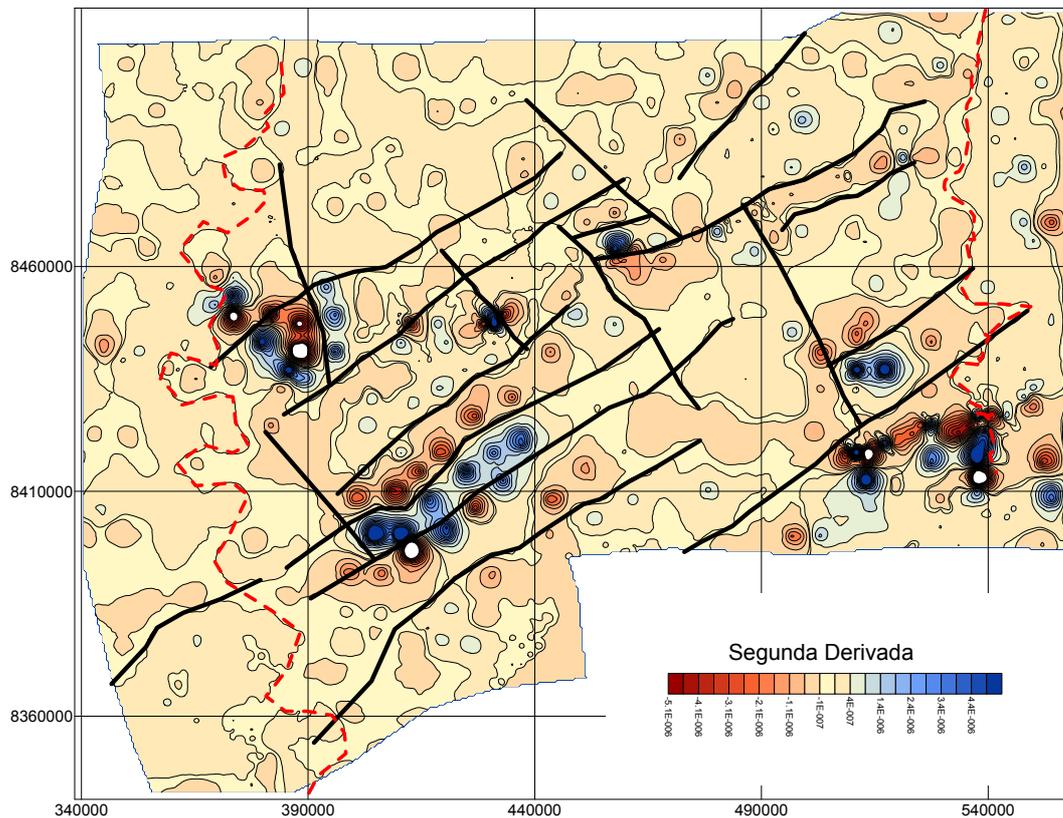
no mapa da Figura 18 pelos contornos nulos da segunda derivada de  $\Delta g$ . Se observa que tais lineamentos praticamente coincidem com linhas de drenagem superficial, suportando a hipótese de que as mesmas seriam estruturalmente controladas.



*Figura 17 – Mapa das anomalias gravimétricas residuais gaussianas, na área das sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso.*

A definição quantitativa da estrutura de blocos falhados no Grupo Urucua e a da configuração estrutural de um substrato de rochas mais densas na área vêm mostradas nos dois perfis transversais apresentados nas Figuras 19 e 20. Na Figura 19 é mostrado o perfil de orientação sudoeste – nordeste, construído na direção dos falhamentos principais. O perfil de orientação noroeste – sudeste, construído na direção dos falhamentos secundários, é mostrado na Figura 20. Esses perfis foram interpretados e ajustados numericamente com a aproximação bi-dimensional de Talwani usando o pacote OASIS MONTAJ. Os valores de massa específica utilizados nesses ajustes bidimensionais foram os seguintes: (i) Grupo Urucua, valor médio de  $2,55 \text{ g/cm}^3$ , em conformidade com estimativas efetuadas a partir da porosidade efetiva determinada em dois poços usando perfilagens geofísicas; (ii) Meta-

sedimentos do Grupo Bambuí, valor médio de  $2,63 \text{ g/cm}^3$ , conforme medidas em laboratório efetuadas com amostras selecionadas na bacia de Irecê (Marinho, 1979); (iii) Embasamento cristalino e/ou calcários maciços do Grupo Bambuí, valor médio de  $2,72 \text{ g/cm}^3$ , em conformidade com valores medidos e com dados da literatura (Marinho, 1979; Telford et al., 1976).



*Figura 18 – Mapa das anomalias gravimétricas residuais (segunda derivada de  $\Delta g$ ), na área das sub-bacias dos rios Arrojado e Formoso.*

O perfil transversal aos lineamentos principais (Figura 19) revela a configuração de um substrato mais denso, estruturado na forma de blocos escalonados, aqui interpretado corresponder a rochas cristalinas pré-cambrianas do cráton São Francisco. Sobre essas rochas, ocorre a seqüência metassedimentar do Grupo Bambuí, representada predominantemente por rochas meta-argilosas e meta-arenosas com alguns meta-calcário intercalado. Recobrendo os metassedimentos se desenvolvem os arenitos e argilitos do Grupo Urucuia que, em geral, possui espessura da ordem de 400 m ao longo do perfil. O erro RMS de ajuste desse perfil com mil pontos interpolados foi de 18,2%.

## **5. CONCLUSÕES**

Os dados elétricos e gravimétricos adquiridos e usados neste trabalho, permitiram definir a estrutura regional do sistema aquífero Urucuia como um pacote permeável acunhado, com espessura saturada variando de cerca de 500m ao longo de um alto divisor de fluxo a zero na porção leste terminal da bacia. Os resultados elétricos estão bem controlados por informações hidrogeológicas de poços e serviram de base para orientar a interpretação dos dados gravimétricos.

O Grupo Urucuia pode alcançar mais de 500 m de espessura, nas proximidades da escarpa da Serra Geral, diminuindo até zero na parte oriental das sub-bacias. Foi aqui dividido em três formações geológicas, designadas como Serra das Araras, Posse e Geribá, de características litológicas e geológicas distintas. Parece ter sofrido uma tectônica de ruptura, com falhas normais de 0 a mais de 300m de rejeito máximo. Tanto a geofísica elétrica quanto a de gravimetria revelam a presença de altos e baixos estruturais controlados por tal tectônica.

Dois comportamentos aquíferos distribuídos em profundidade foram identificados na sub-bacia: (i) um sistema de superfície livre, desenvolvido nos níveis arenosos superiores da Formação Urucuia; (ii) um sistema parcialmente confinado, nos mesmos arenitos do Urucuia, controlado por intervalos arenosos muito silicificados.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a FINEP/CT-HIDRO pelo financiamento do projeto URUCUIA, dentro da REDE COOPERATIVA DE PESQUISA: Comportamento de Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro. Ao Observatório Nacional/CNPq e ao Centro de Geociências da UFBA pela cessão de gravímetro e técnico geofísico para sua operação, em apoio a execução do levantamento gravimétrico. Ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa e de Mestrado concedidas a O. Lima e Emerson S. , respectivamente. Aos técnicos de campo do CPGG/UFBA, José M. dos Santos, Luiz M. dos Santos e José M. da Paz e a equipe da OPA Engenharia, Eng<sup>o</sup>. Antônio R. M. Teles e técnicos Severino S. Simeão e José A. Paixão, pelo empenho na execução dos trabalhos de campo. Ao CPGG/UFBA e a CPRM pelo ambiente e apoio à execução do referido projeto.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amorim Junior, V. e Lima, O. A. L., 2007, Avaliação hidrogeológica do Aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas usando resistividade e polarização elétrica induzida. *Rev. Bras. Geof.*, no prelo, Rio de Janeiro, RJ.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: *Trans. Am. Inst. Min. Engrs.*, **146**, 54-67.
- Asquith, G. B., 1990, Log Evaluation of Shaly Sandstones: A Practical Guide. Continuing Education Course Note Series # 31, Am. Ass. Pet. Geol., Tulsa, OK, USA.
- Asquith and Gibson, 1982, Basic well Log Analysis for Geologists, AAPG, Methods in Exploration Series.
- Brasil, 1982, Projeto RADAMBRASIL, Folha SD 23, Brasília: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso da Terra. MME, Rio de Janeiro, RJ.
- CPRM, 2005, Termo de Referência para Levantamento Geofísico no Aquífero Urucuia – Bacias Hidrográficas dos Rios Arrojado e Formoso. Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Rio de Janeiro, RJ.
- CPRM, 2006, Diagnóstico do Estado da Arte dos Estudos Realizados na Área das Bacias dos Rios Arrojado e Formoso. Serviço Geológico do Brasil, CPRM, Rel. Tec., Salvador, BA.
- Campos, J. E. G. e Dardenne, M. A., 1997, Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana. *Rev. Bras. Geoc.*, **27**, 269-282.
- Dardenne, M. A., 1978, Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30º Cong. Bras. Geol., **2**, 568-610, São Paulo, SP.

- Gomes, R. D. e Mota, A. C., 1980, Projeto Levantamento Gravimétrico do Estado da Bahia. Serviço Geológico do Brasil, Serviço Geológico do Brasil, Conv. CPRM/DNPM, Rel. Tec., Salvador, BA.
- Ghignone, J. I., 1979, Geologia dos Sedimentos Fanerozóicos do Estado da Bahia. In: Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Textos Básicos, v. 1, cap. 3, SME/COM, Salvador, BA.
- Koefoed, O. 1979. Resistivity Sounding Measurements: Geosounding Principles. Methods in Geochemistry and Geophysics. Elsevier. Amsterdam.
- Lima, E. A. L. e Leite, E. J. F. 1978. Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar Parnaíba: Integração geológico-metalogenética. Rel. DNPM/CPRM, 16v., Recife, PE.
- Lima, O. A. L. e Sharma, M. M., 1990, A grain-conductivity approach to shaly sandstones. Geophysics, **55**, 1347-1356, USA.
- Lima, O. A. L. e Sharma, M. M., 1992, A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands. Geophysics, **57**, 789-799, USA.
- Lima, O. A. L. e Nery, G. G., 1999, Determinação da resistividade elétrica de águas intersticiais usando perfilagem de potencial espontâneo. 6<sup>th</sup> Internat. Cong. SBGf, Expanded Abstract CDROM, Rio de Janeiro, RJ.
- Lima, O. A. L. e Sri Niwas, 2000, Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstones from geoelectrical measurements. Jour. Hydrol., **235**, 12-26.
- Lima, O. A. L., Clennell, M. B., Nery, G. G. e Sri Niwas, 2005, A volumetric approach for the resistivity response of freshwater shaly sandstones. Geophysics, **70**, F1-F10, USA.
- Marinho, J. M. L., 1979,
- Meju, M. A., Fontes, S. L., Oliveira, M. B. F., Lateral, E. F., Uluguerli, E. U. e Carrasquilla, A. G., 1999, Regional aquifer mapping using combined VES-TEM-AMT/EMAP methods in the semi-arid eastern margin of Parnaíba basin, Brazil. Geophysics **64**, 337-356, USA.
- Molina, E. C., Ussami, N. e Maragoni Y. A., 1997, Digital 5'x5' gravity maps of the São Francisco Craton. IAG/USP, Pub. Esp., São Paulo, SP.
- Moutinho da Costa, L. A. 1976. Projeto Leste do Tocantins/Oeste do rio São Francisco – LETOS. DNPM/CPRM/PROSPEC, Rel. Final Integrado, Rio de Janeiro, RJ.

- Oliveira, M. A. M., 1967, Contribuição a geologia da parte sul da bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Petrobras, Rel. Exp. 1, Rio de Janeiro, RJ.
- Pereira, P. A. e Lima, O. A. L., 2007, Estrutura elétrica da contaminação hídrica provocada por fluidos provenientes dos depósitos de lixo urbano e de um curtume, no município de Alagoinhas, Bahia. Rev. Bras. Geof., no prelo, Rio de Janeiro, RJ.
- Petrobras, 1969, Levantamentos gravimétricos das bacia do Maranhão, Potiguar, Sergipe-Alagoas, Recôncavo-Tucano. Rel. de Exploração. Rio de Janeiro, RJ.
- Petrobras, 1970, Mapa Bourger das bacias do Recôncavo e Tucano Sul; Escala 1:100.000. Petrobras DEXBA, Salvador, BA.
- Schlumberger, 1989, Log Interpretation. Principle/Aplications. Schlumberger Educational Services, Houston TX, USA.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. e Keis, D. A., 1976, Applied Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, R.U.
- Vozoff, K. 1958. Numerical resistivity analysis: Horizontal Layers. Geophysics 23: 536-556.
- Ward, S. H., 1990, Resistivity and Induced Polarization Methods. In: Ward, S. H., Ed., Geotechnical and Environmental Geophysics. Soc. Expl. Geophys., Tulsa OK, USA.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., e Gardner, G. H. F., 1956, Elastic wave velocities in heterogeous and porous media. Geophysics, **23**, 654-672.