

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROSPECÇÃO GEOFÍSICA DE AQUÍFEROS FRATURADOS
PELO MÉTODO DE ELETRORRESISTIVIDADE**

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF-14/10)

Felipe Schaeffer Santos

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-orientador: Geól. Arnaldo Giardin

SÃO PAULO

2014

TF
S237
FS.p

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROSPECÇÃO GEOFÍSICA DE AQUÍFEROS FRATURADOS
PELO MÉTODO DE ELETRORRESISTIVIDADE**



MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-14/10)

Felipe Schaeffer Santos

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

Co-orientador: Geól. Arnaldo Giardin

DEDALUS - Acervo - IGC



30900032377

SÃO PAULO

2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus. Agradeço a oportunidade de estudar em um dos melhores centros acadêmicos do país, e por Ele ser meu refúgio e escudo em todo o tempo. Agradeço extremamente ao Prof. Dr. Gallas, pois mesmo sendo um profissional renomado em sua área de atuação manteve-se uma pessoa humilde, acessível e apta a ensinar. Agradeço ao geólogo Arnoldo Giardin, pois através de sua profissão é que este Trabalho de Formatura pôde ser realizado. Agradeço também ao Fiona (agora Mestre Diego Daniel Silva) pela presença indispensável no trabalho de campo, cuja ausência inviabilizaria este projeto. Agradeço aos meus pais pelo suporte e estrutura que me possibilitaram focar nos estudos com paz e tranquilidade. Por último, e não menos importante, agradeço aos amigos e colegas que me apoiaram e exortaram durante estes cinco anos de graduação. Sou realmente grato a todos.

RESUMO

Este trabalho de formatura provém da iniciativa de otimizar a locação de poços tubulares através de investigações indiretas a fim de explorar água. Para tanto, foi escolhido o método de eletrorresistividade e aplicada a técnica de caminhamento elétrico. O trabalho de campo consistiu no levantamento de 4 (quatro) linhas de caminhamento elétrico denominadas linhas A, B, C e D. Após o levantamento geofísico em campo, as medidas de resistividade aparente foram modeladas no programa de inversão RES2DINV e, a seguir, foram interpoladas no Surfer 8 a fim de se apresentar as resistividades na forma de seções modeladas e mapas de resistividade. A metodologia aplicada para a determinação dos locais mais propícios para a perfuração dos poços consiste em estabelecer a correlação entre zonas de baixa resistividade com estruturas fissuradas em rochas cristalinas capazes de armazenar e transmitir água. Os resultados do levantamento geofísico e as correlações interpretadas permitiram indicar quatro locais potenciais para a perfuração dos poços tubulares.

ABSTRACT

This final degree comes from the initiative to optimize the location of wells through indirect investigations to exploit water. To do this research, was chosen the method of electrical resistivity survey and applied the technique of electrical profiling. The field work was done in (4) four profiles of resistivity. After the geophysical survey in the field, the measurements of resistivity were modeled in the inversion program RES2DINV and then were interpolated in the Surfer 8 in order to present the resistivity in a modulated section and maps of resistivity. The applied methodology to determine the most favorable locations for drilling wells is establishing a correlation between zones of low resistivity structures in fractured crystalline rocks which are capable of storing water and to transmit it. The results of the geophysical survey and interpreted correlations have showed four potential sites for drilling of wells.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo. A) Goiás no Brasil; B) Luziânia em Goiás; C) Área de estudo em Luziânia; e D) Área de estudo. Linhas amarelas são as linhas de levantamento geofísico, e em vermelho está delimitada a área investigada.....	3
Figura 2. Faixa Brasília contextualizada na Província Tocantins.....	4
Figura 3. Faixa de Dobramento Brasília e seus principais domínios.....	6
Figura 4. A) Mapa da geologia local com a área de estudo e o município de Luziânia; B) Mapa com as províncias estruturais brasileiras, e em destaque vermelho o Estado de Goiás.....	7
Figura 5. A) Quartzo mica xisto aflorando no chão próximo à linha A; B) Quartzo mica xisto muito alterado, com coloração vermelha aflorando em corte artificial dentro da Fazenda Bom Jesus; C) Quartzo mica xisto aflorando em barranco próximo à linha A; D) Quartzo mica xisto pouco alterado aflorando em drenagem seca que atravessa as linhas C e D.....	8
Figura 6. A) Amostra retirada na linha A; B) Amostra retirada na linha D; C) Amostras retiradas na linha D; D) Amostra retirada na linha A.....	8
Figura 7. Principais bacias hidrográficas do Estado de Goiás.....	9
Figura 8. Precipitação anual total dos últimos dez anos na Bacia Hidrográfica do Rio Corumbá.....	10
Figura 9. Precipitações médias mensais para a Bacia do Rio Paranaíba.....	11
Figura 10. Perfis típicos de rugosidade.....	17
Figura 11. Equipamentos utilizados em campo.....	18
Figura 12. Faixa média das resistividades das principais rochas.....	19
Figura 13. Forma geral da configuração de eletrodos usada em medições de eletrorresistividade.....	20
Figura 14. Disposição dos elementos e o princípio do método da eletrorresistividade.....	22
Figura 15. Caminhamento Elétrico (CE). Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo.....	23
Figura 16. Distribuição dos retângulos gerados pelo programa RES2DINV conforme os data points da seção.....	25
Figura 17. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha A.....	26

Figura 18. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha B.....26

Figura 19. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha C.....27

Figura 20. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha D.....27

Figura 21. Mapa de resistividade do nível 2 de investigação, teoricamente correspondente à profundidade de 16m das seções modeladas de resistividade.....28

Figura 22. Mapa de resistividade do nível 3 de investigação, teoricamente correspondente à profundidade de 26m das seções modeladas de resistividade.....29

Figura 23. Principais interpretações obtidas através do levantamento geofísico e mapeamento em campo.....31

Figura 24. Área de estudo com coordenadas em UTM segundo o datum WGS 1984 - World Mercator. Quadrícula 22 K.....32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação do conteúdo iônico dissolvido em fluidos com a eletrorresistividade.....	18
Tabela 2. Informações pertinentes das grandezas até aqui mencionadas, como seus símbolos e unidades.....	21

SUMÁRIO

RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	IV
LISTA DE TABELAS.....	VI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. JUSTIFICATIVA.....	2
4. AREA DE ESTUDO.....	2
4.1. Geologia Regional.....	2
4.1.1. Unidade Estrutural do Cráton São Francisco.....	5
4.1.2. Unidade Externa da Faixa Brasília.....	5
4.1.3. Unidade Interna da Faixa Brasília.....	5
4.1.4. Arco Magmático de Goiás.....	6
4.1.5. Maciço de Goiás.....	6
4.2. Geologia Local.....	7
4.3. Hidrografia Local.....	9
4.3.1. Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba.....	9
4.3.1.1. Bacia Hidrográfica do Rio Corumbá.....	10
4.4. Aspectos Fisiográficos e Climáticos.....	10
5. TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM A TÉCNICA GEOFÍSICA.....	12
6. HIDROGEOLOGIA DE AQUÍFEROS FISSURAIS.....	15
7. MATERIAIS E METODOLOGIA.....	17
7.1. Materiais.....	17
7.2. Métodos.....	18

7.2.1. <i>Eletorresistividade</i>	20
7.2.1.1. Sondagem Elétrica Vertical – SEV.....	22
7.2.1.2. Caminhamento Elétrico – CE.....	22
7.2.2. <i>Inversão dos Dados</i>	24
8. RESULTADOS OBTIDOS.....	25
9. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	30
10. CONCLUSÕES.....	32
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

A água, embora seja um recurso natural abundante, devido à necessidade de índices de qualidade específicos para ingestão, grande quantidade, má administração da distribuição e poluição de muitos mananciais, torna-se um recurso escasso em muitas regiões.

Com o agravante da megapopulação urbana, do crescimento do setor industrial e alimentício, o recurso hídrico tornou-se muito explorado, e a necessidade de pluralizar as reservas de água em seu estado líquido e potável tornou-se imprescindível. Desse modo, a exploração e subsequente produção de água subterrânea deixaram de ter papel coadjuvante, mas papel indispensável no abastecimento hídrico em todos os setores.

Sobre a importância da água e suas fontes para abastecimento, o exemplo contemporâneo a ser citado é a atual crise hídrica que assola a região sudeste, notadamente São Paulo, cujos reservatórios estão praticamente esgotados devido à seca histórica recorde que ora acontece.

Levando em conta este cenário e a necessidade de volumes consideráveis de água no setor de produção de bebidas, o consultor para recursos hídricos da Coca-Cola indicou a perfuração de poço(s) tubular(es) para captação destes recursos.

No sentido de otimizar a locação deste(s) poço(s), foram efetuados levantamentos geofísicos de eletrorresistividade para identificação de estruturas em subsuperfície capazes de armazenar água e transmiti-la.

Desta forma, este trabalho consiste na aplicação da geofísica - eletrorresistividade - para investigação de anomalias em subsuperfície e interpretá-las visando sua correlação com a porosidade secundária (fraturas), uma vez que a geologia local é constituída predominantemente por rochas metamórficas em que a porosidade primária não foi preservada.

O trabalho de campo foi realizado entre os dias 30/05 e 05/06, executando-se quatro linhas de eletrorresistividade em número e extensão adequados à realidade física (principalmente condições de acesso) da área a ser estudada.

Os dados brutos obtidos em campo foram processados em programas computacionais e serão apresentados no final deste Trabalho de Formatura em forma de pseudo-seções de resistividade aparente, seções modeladas e mapas de resistividade.

2. OBJETIVOS

Este Trabalho de Formatura visa familiarizar o aluno com a geofísica aplicada e seus aspectos práticos no âmbito profissional em um caso real de aplicação dos métodos e técnicas geofísicas.

Adicionalmente, este Trabalho de Formatura tem como meta, através da geofísica aplicada, evidenciar potenciais aquíferos nas rochas metamórficas em subsuperfície. Os potenciais aquíferos serão correlacionados às anomalias de baixas resistividades detectadas. Após a avaliação dos dados obtidos através do levantamento geofísico foram indicados locais para as perfurações dos poços tubulares que poderão explorar os aquíferos em profundidade.

3. JUSTIFICATIVA

A relevância do tema é evidente, já que envolve a exploração de um bem mineral extremamente importante e indispensável à vida: a água, e a questão de seu abastecimento é extremamente delicada em vários locais do Brasil.

O *feedback* do método empregado é positivo, pois não polui, não é invasivo e não deixa legados negativos para a região em que foram feitos os levantamentos após a conclusão do trabalho, como desmatamento (com exceção da eventual necessidade de abrir picadas), poluição de aquíferos, poluição visual etc.

A existência de anomalias e suas possíveis interpretações são abordadas de forma detalhada nos itens Materiais e Metodologia, Resultados Obtidos e Interpretação e Discussão dos Resultados.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo fica no extremo oeste do município de Luziânia, situado no Estado de Goiás, precisamente dentro da Fazenda Bom Jesus, conforme figura 1. O principal acesso à área dá-se pela estrada GO-010, que liga a área de estudo ao centro de Luziânia.

4.1. Geologia Regional

A região estudada está inserida dentro do contexto da Faixa de Dobramento Brasília (FDB), gerada no Neoproterozoico durante a Orogênese Brasileira há cerca de 600 Ma. Situada na porção oriental da Província Tocantins a Faixa Brasília limita-se a leste com o Cráton São Francisco, a sul com a Faixa Alto Rio Grande, a sudoeste é recoberta por sedimentos da Bacia do Paraná e a oeste limita-se com o Maciço de Goiás (Fonseca *et al.* 1995). A FDB estende-se por mais de 1000 km de comprimento e 300 km de largura, com

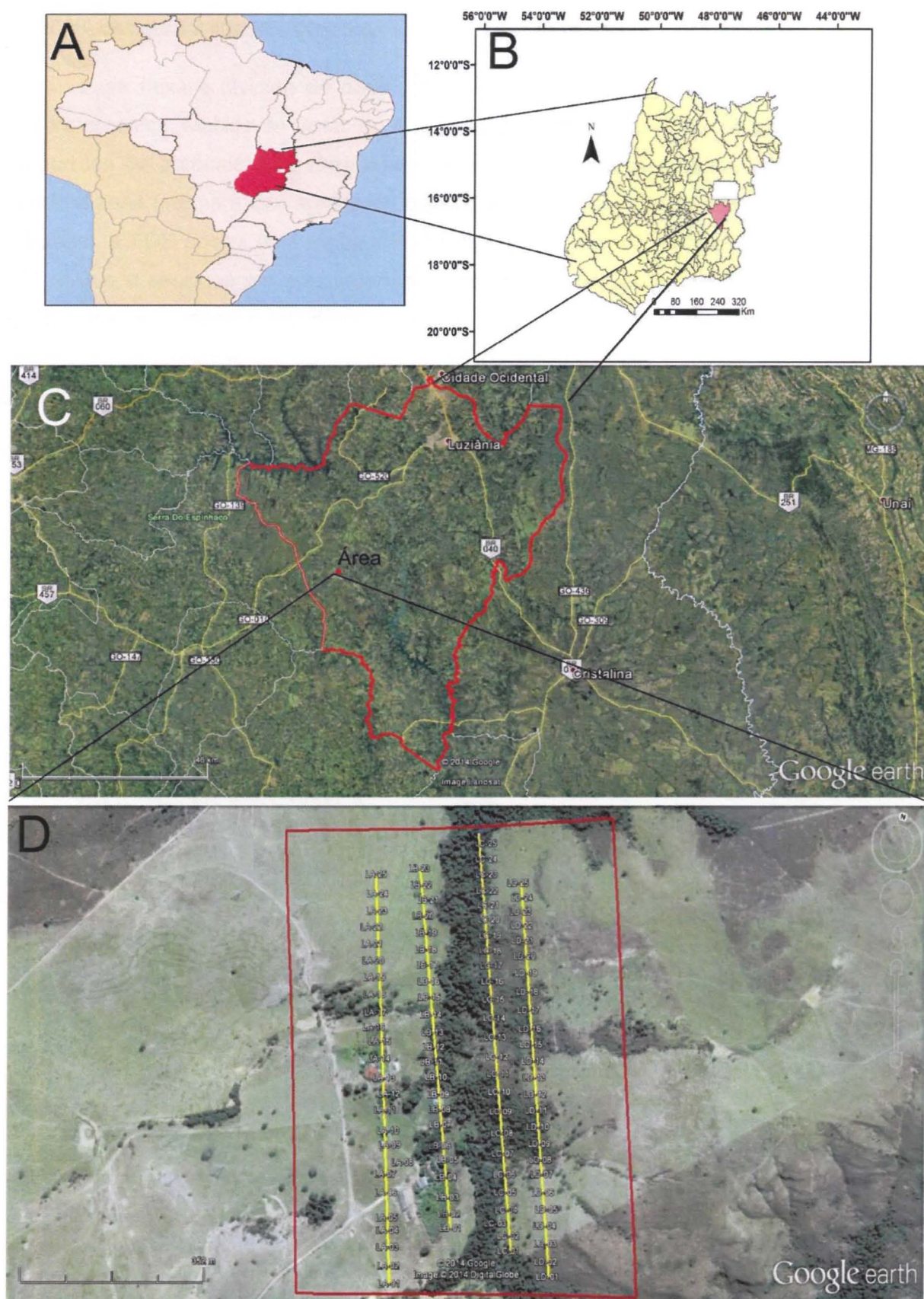


Figura 1. Localização da área de estudo. A) Goiás no Brasil; B) Luziânia em Goiás; C) Área de estudo em Luziânia; e D) Área de estudo. Linhas amarelas são as linhas de levantamento geofísico, e em vermelho está delimitada a área investigada. A figura 24 mostra a área de estudo novamente com as coordenadas. Fonte: Google Earth 2014. Editado.

direção aproximada N-S, bordejando a margem ocidental do Cráton São Francisco (Silva *et al.* 2006). A figura 2 ilustra o descrito.

Essa faixa é dividida de oeste para leste em Arco Magmático de Goiás de idade neoproterozóica, Maciço de Goiás do Arqueano/Paleoproterozoico e o cinturão de dobras e empurrões de antepaís com vergência para leste, subdividido em zona interna e externa, sendo a zona interna a que apresenta maior grau de metamorfismo (Laux 2004). De forma adicional, a FDB possui uma mega inflexão ímpar denominada Pirineus, próxima à latitude 16° S, que a secciona em dois segmentos distintos, sendo assim, muitos autores a divide em setores setentrional e meridional (Fonseca *et al.* 1995 e Uhlein *et al.* 2012). Excluem-se desta última segmentação o Arco Magmático de Goiás e o Grupo Bambuí.

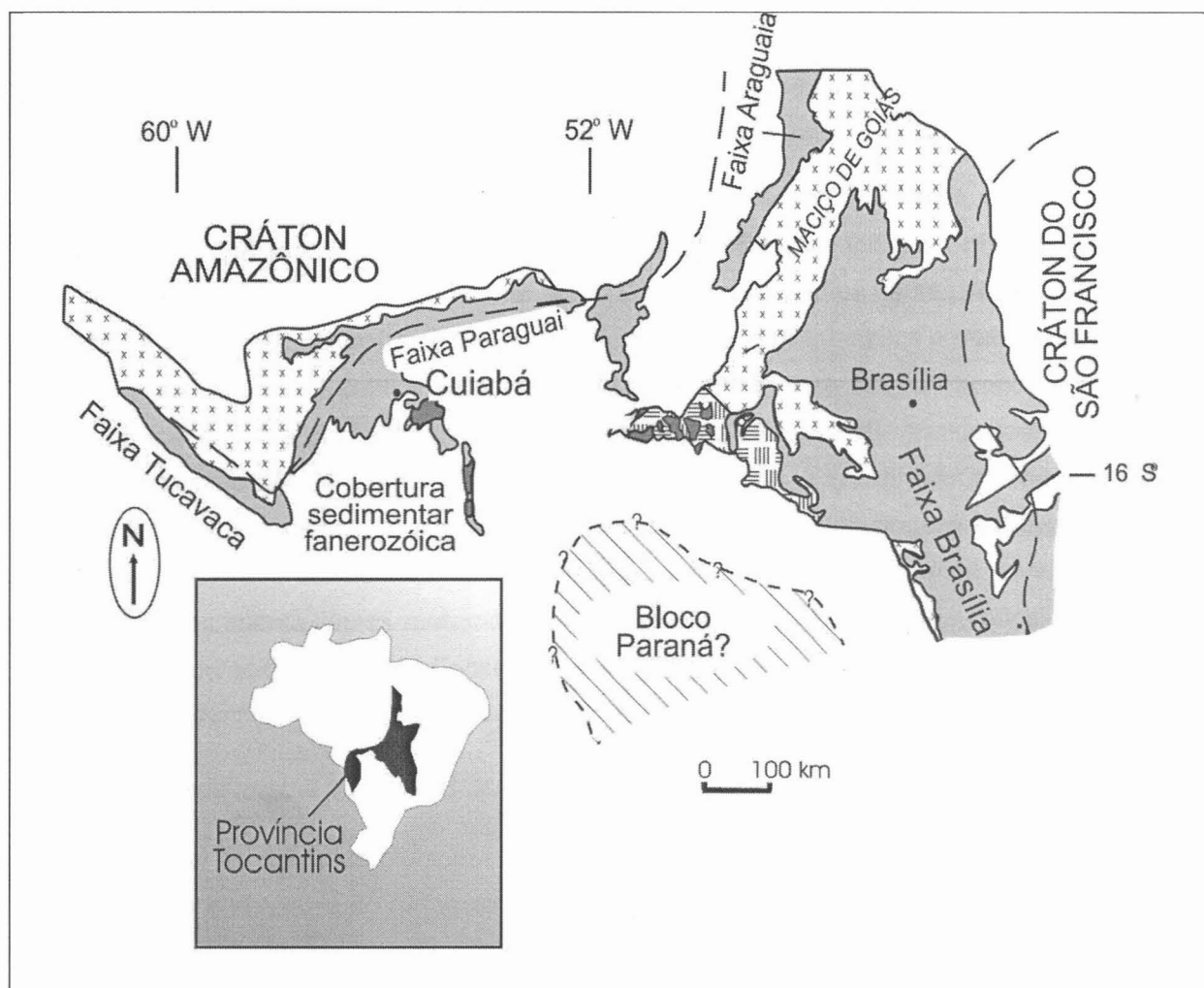


Figura 2. Faixa Brasília contextualizada na Província Tocantins. Fonte: Silva *et al.* (2006). Editado.

A Faixa Brasília mostra uma evolução complexa e possivelmente diacrônica. A porção meridional é o resultado da interação entre o Cráton São Francisco e o embasamento da Bacia do Paraná, enquanto a porção setentrional registra interação entre os crátons São Francisco e Amazônico. Durante esse processo diacrônico, houve a

interação das unidades que se encontravam entre estes crátons, como o Maciço de Goiás, arcos magmáticos neoproterozoicos e as sequências sedimentares meso-neoproterozóicas, o que resultou em uma faixa móvel com forte presença metamórfica (Uhlein *et al.* 2012). As unidades mencionadas acima serão descritas a seguir e estão ilustradas na figura 3.

4.1.1 Unidade Estrutural do Cráton São Francisco

As sequências metassedimentares localizadas na borda ocidental do Cráton São Francisco tratam-se de um domínio autóctone e são constituídas pelo Grupo Bambuí e Grupo Vazante, com sedimentos argilosos carbonáticos suavemente dobrados e sub-horizontais e extensas coberturas fanerozóicas (Uhlein *et al.* 2012). Alguns autores, como Fonseca *et al.* (1995) colocam os grupos Bambuí e Vazante dentro da Unidade Externa da Faixa Brasília.

4.1.2 Unidade Externa da Faixa Brasília

É composta por unidades metassedimentares do Mesoproterozoico, assim como por porções do embasamento Arqueano – Paleoproterozoico que mostram rejuvenescimento devido à tectônica brasileira (Uhlein *et al.* 2012). Estão presentes nesta unidade os grupos Araí, Paranoá, Ibiá, Canastra. O Grupo Araí é constituído por quartzitos e metavulcânicas na base e por sequência pelítica-carbonática no topo, enquanto o Grupo Paranoá é formado por uma sequência psamítica-pelítica a leste da Faixa Brasília, que transaciona para uma sequência pelítica-carbonática para o oeste. O Grupo Ibiá é constituído praticamente por metadiamictitos e xistos, e é classificado como uma sequência glaciogênica (Silva 2006). O Grupo Canastra é considerado um equivalente lateral do Grupo Paranoá, mas de forma adicional, apresenta fácies metamórfica mais alta (Uhlein *et al.* 2012). Todos os grupos mencionados acima, segundo Fonseca *et al.* (1995), estão estruturados em um cinturão de dobras e falhas de antepaís com vergência para o Cráton São Francisco.

4.1.3 Unidade Interna da Faixa Brasília

Inclui as unidades alóctones do Grupo Araxá e Grupo Serra da Mesa, assim como porções do embasamento fortemente envolvidas na tectônica brasileira (exemplo: Maciço de Goiás). Localmente, ainda ocorrem complexos máficos-ultramáficos granulizados e sequências vulcanossedimentares proterozóicas. O Grupo Araxá é constituído por gnaisses, quartzitos e xistos na fácies xisto verde. O Grupo Serra da Mesa é constituído por xistos com granada, estauroлита, cianita e intercalações de quartzitos e mármore, sendo este grupo um provável equivalente lateral do Grupo Araxá (Uhlein *et al.* 2012).

4.1.4 Arco Magmático de Goiás

Esta unidade é constituída por rochas metaplutônicas associadas às faixas de rochas metassedimentares e metavulcânicas que apresentam características similares às dos arcos de ilhas modernos intraoceânicos e cordilheiranos (Laux 2004). Segundo Navarro *et al.* (2007), dados isotópicos e geoquímicos sugerem que essas rochas são neoproterozóicas associadas à subducção de crosta oceânica, e consequente geração de arcos de ilhas.

4.1.5 Maciço de Goiás

O Maciço de Goiás é representado por sequências de *greenstones* arqueanos e TTGs, ortognaisses paleoproterozoicos amplamente recobertos por rochas supracrustais, e complexos máfico-ultramáficos acamadados associados com sequências vulcanossedimentares (Laux 2004). O Maciço de Goiás é interpretado como um bloco alóctone amalgamado à FDB durante o Neoproterozoico.

Pimentel & Fuck (1994) referem-se a este maciço como um mosaico de blocos compreendendo terrenos de idade arqueana, bem como áreas neoproterozóicas formadas em ambiente de arcos magmáticos.

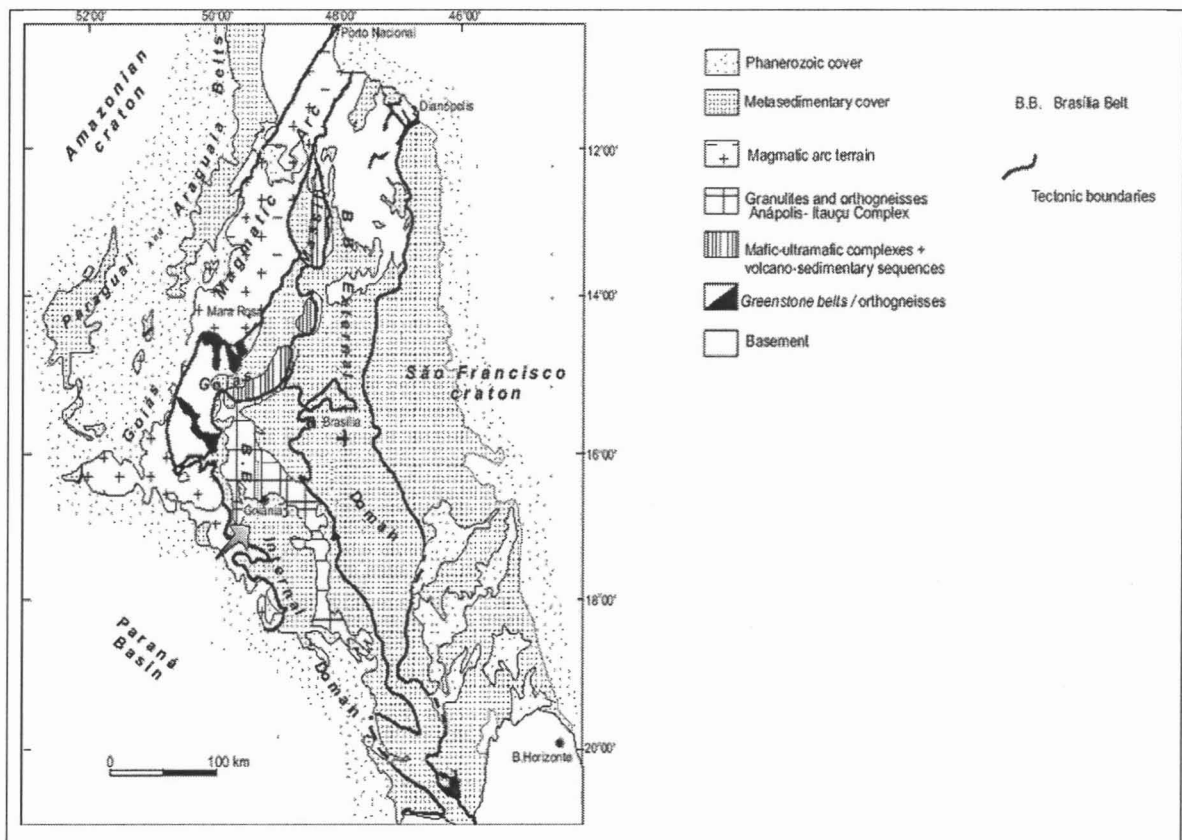


Figura 3. Faixa de Dobramento Brasília e seus principais domínios. Fonte: Fischel *et al.* (2001). Editado.

4.2. Geologia Local

A área de estudo encontra-se, segundo CPRM (2000) e associação litológica de campo, inserida dentro do Grupo Canastra (figura 4). As rochas deste grupo afloram em uma faixa de mais de 650 km, desde o sudoeste de Minas Gerais até o sudeste de Goiás e sul do Distrito Federal. De acordo com Silva (2006), o Grupo Canastra encontra-se em contato tectônico com os grupos Araxá e Ibiá, sendo difícil a reconstituição das relações originais de contato entre estes grupos devido ao grande evento tectônico que os envolveu.

Conforme Silva (2006), o Grupo Canastra representa parte de uma bacia de margem passiva aberta no fim do Mesoproterozoico, com expressão predominante ao sul de Brasília, sendo que, os litotipos correspondentes à área de estudo deste trabalho de formatura representam um megaciclo regressivo.

A rocha predominante na área é um quartzo-clorita-sericita-muscovita xisto (quartzo mica xisto), de textura média a grossa, intercalado por lentes centimétricas de muscovita quartzito e ortoquartzitos (figuras 5 e 6). A foliação principal da rocha, assim como as lentes quartzosas, encontram-se extremamente crenuladas. Segundo Silva (2006) e assembléia mineralógica vista em campo, é possível estimar sua fácies metamórfica em xisto verde médio.

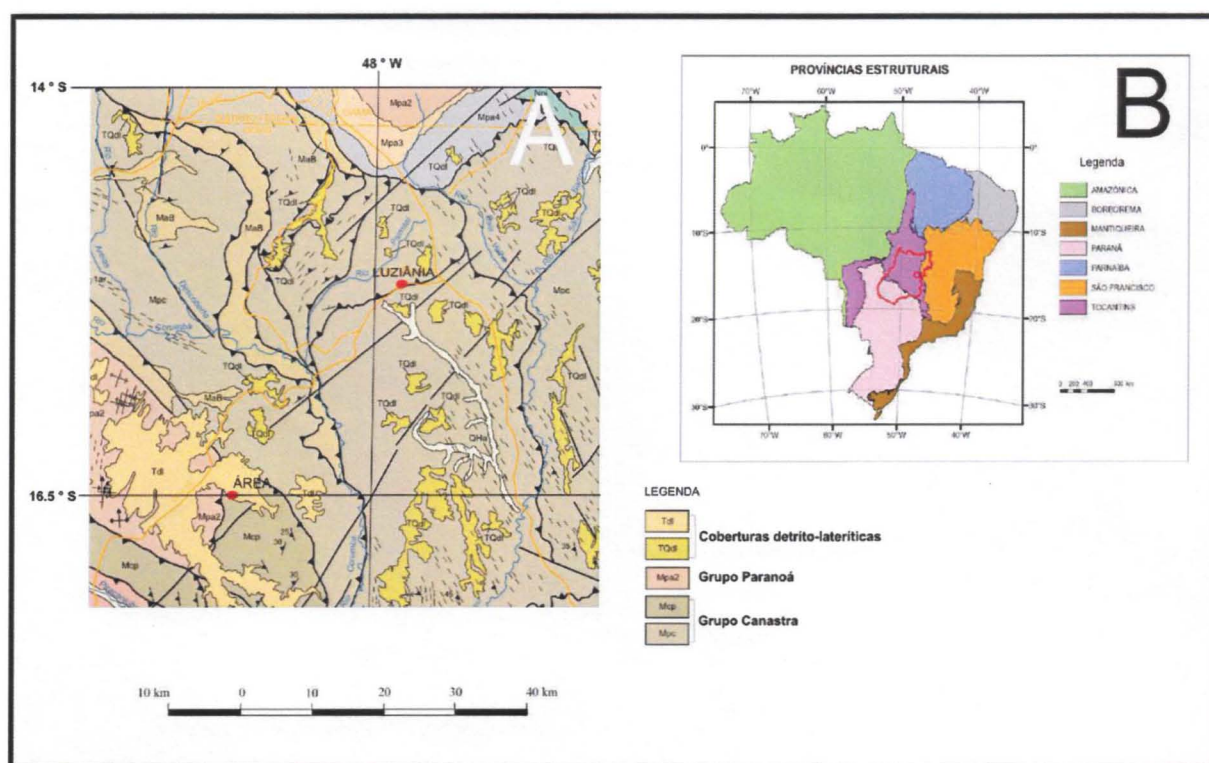


Figura 4. A) Mapa da geologia local com a área de estudo e o município de Luziânia; B) Mapa com as províncias estruturais brasileiras, e em destaque vermelho o Estado de Goiás. Fontes: CPRM (2000) e CPRM (2008). Editado.

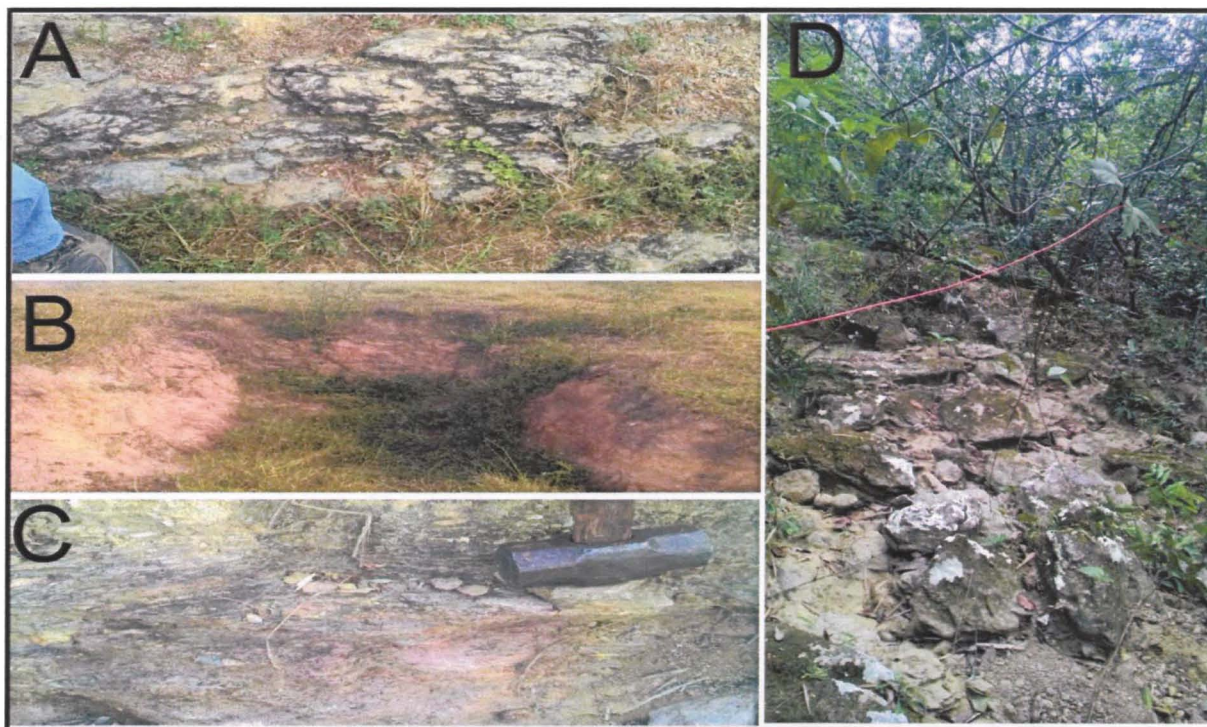


Figura 5. A) Quartz mica xisto aflorando no chão próximo à linha A; B) Quartz mica xisto muito alterado, com coloração vermelha aflorando em corte artificial dentro da Fazenda Bom Jesus; C) Quartz mica xisto aflorando em barranco próximo à linha A; D) Quartz mica xisto pouco alterado aflorando em drenagem seca que atravessa as linhas C e D.

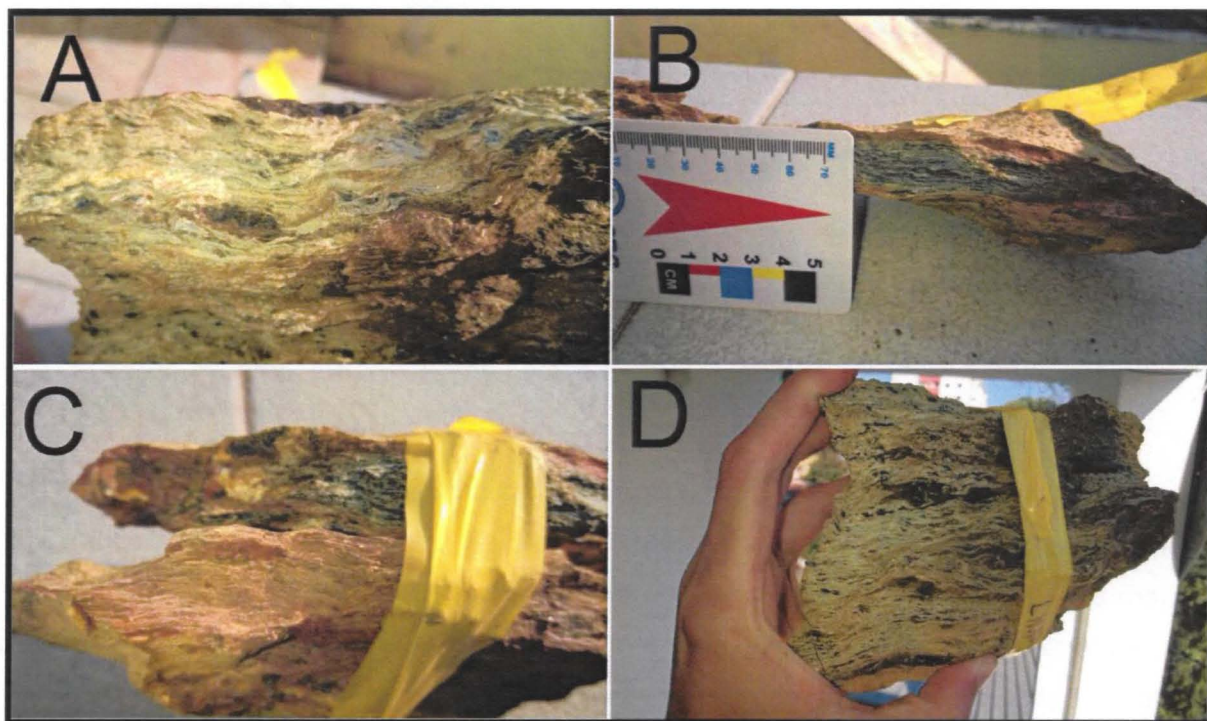


Figura 6. A) Amostra retirada na linha A; B) Amostra retirada na linha D; C) Amostras retiradas na linha D; D) Amostra retirada na linha A.

4.3. Hidrografia Local

O rio que passa tangente à área estudo é o Rio Corumbá. Este é afluente da Bacia do Rio Paranaíba, uma das quatro bacias hidrográficas que cobrem o território goiano, como visto na figura 7.

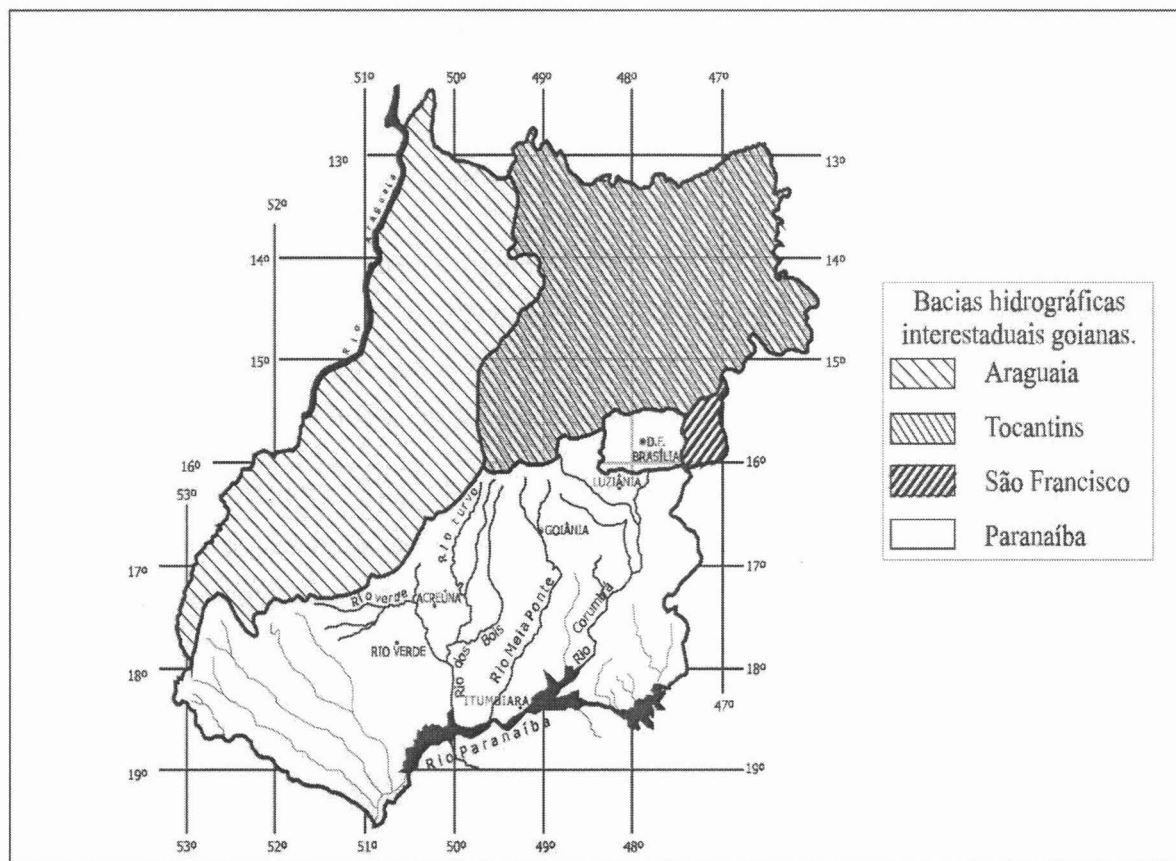


Figura 7. Principais bacias hidrográficas do Estado de Goiás: Fonte: Mattos (2000).

4.3.1 – Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba

A Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba drena uma área total de 220.195 km², deste total 67,89% se encontra no Estado de Goiás, ou seja, uma área correspondente a 149.490,38 km² (Mattos 2000).

Segundo Mattos (2000), a Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba possui precipitação pluviométrica anual variando entre 1200 e 1800 mm, sendo o período chuvoso concentrado entre os meses de novembro e março, ênfase nos meses de janeiro, fevereiro e março. Segundo o mesmo autor, o período de estiagem mais intenso geralmente é relatado nos meses de junho, julho e agosto. Durante o verão é precipitado mais de 75% do total anual das chuvas, já no inverno essa porcentagem corresponde a 1,5% do total anual.

Os principais impactos ambientais que afetam esta bacia hidrográfica estão associados à alta quantidade de barragens construídas ao longo do Rio Paranaíba.

Adicionalmente, em razão de a bacia estar inserida em um contexto de alta concentração populacional, a ocupação insustentável do solo tem agravado os problemas ambientais nesta bacia, como o assoreamento de rios, ausência de cobertura vegetal ciliar, problemas de escassez de água, erosão e perda de solo agricultáveis (Souza 2006).

4.3.1.1 – Bacia Hidrográfica do Rio Corumbá

O Rio Corumbá nasce na Serra dos Pirineus a 1200 m de altitude, próximo à divisa dos municípios de Cocalzinho e Pirenópolis, na porção central do Estado de Goiás. O rio possui aproximadamente 576 km de percurso até desaguar no Rio Paranaíba (Souza 2006).

O Rio Corumbá é extremamente afetado devido ao adensamento populacional que há em sua bacia hidrográfica. Abrangendo aproximadamente 20 municípios do Estado de Goiás (inclusive Luziânia) e quase todas as cidades satélites do Distrito Federal, o total de habitantes associados à bacia chega aos 3 milhões (Mattos 2000 e Souza 2006).

Segundo Mattos (2000), o cuidado com despejo de esgoto sanitário e lixo domiciliar não é eficiente ou quase não existe em muitos municípios, o que torna as drenagens do Rio Corumbá um esgoto a céu aberto. O trabalho deste autor relata diversos outros impactos ambientais provenientes de problemas sociais que afetam de forma direta a Bacia Hidrográfica do Corumbá.

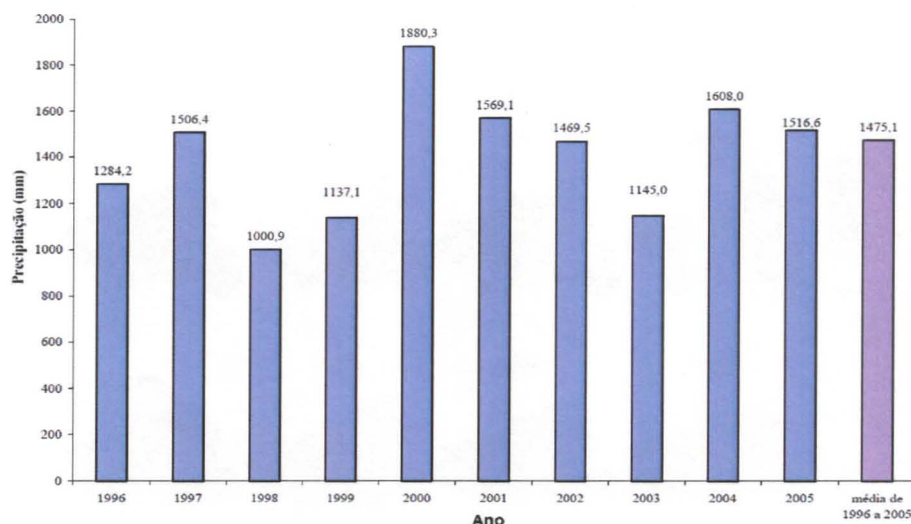


Figura 8. Precipitação anual total dos últimos dez anos na Bacia Hidrográfica do Rio Corumbá. Fonte: Souza (2006).

4.4. Aspectos Fisiográficos e Climáticos

A área de estudo situa-se dentro do bioma cerrado. As formas de relevo características do cerrado são as residuais de superfícies de aplainamento (chapadas) com topografia plana e suavemente ondulada. Adicionalmente, encontram-se áreas serranas,

depressões periféricas e interplanálticas, além de vales fluviais alongados cujas encostas testemunham processos alternados de dissecação e de pedimentação (Souza 2006). O cerrado possui uma extensão de 200 milhões de hectares, ocupando 25% do território brasileiro.

Segundo a Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (Cobrape 2010), a classificação climática de Köppen predominante na área é a AWi, que sugere clima tropical, quente em todas as estações do ano (temperatura média mensal $\geq 18^{\circ}\text{C}$), com inverno seco. Devido à topografia monótona regional somada à posição latitudinal, a área de estudo está inserida em contexto climático que possui uma pequena amplitude térmica anual e pequena variabilidade espacial.

Conforme dados apresentados pela Cobrape (2010), o mês mais quente na região é outubro, quando é verificada a maior incidência solar na região, já o mês mais frio é julho. A amplitude térmica média anual fica em torno de 6°C .

A umidade maior ocorre quando há predominância do sistema de convergência do Atlântico Sul (Cobrape 2010), destacada no período de novembro a abril, encontrando-se acima de 75%. Os meses de junho a setembro geralmente possuem umidade abaixo de 65%. Os maiores índices de umidade relativa são registrados nos meses de dezembro e janeiro, com valores médios superiores a 80%. Os menores valores ocorrem no mês de agosto, com médias próximas aos 50%.

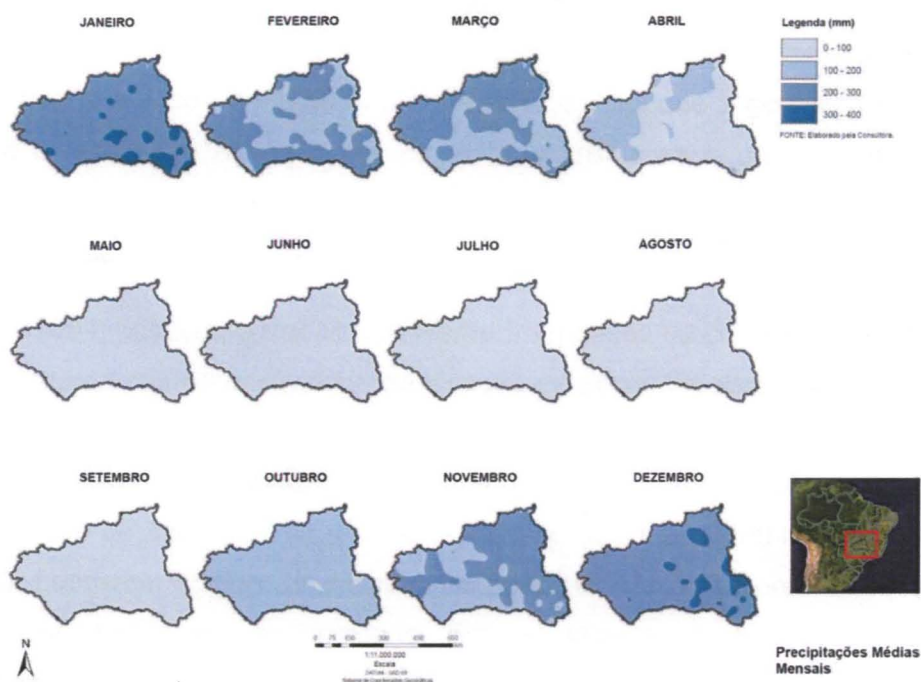


Figura 9. Precipitações médias mensais para a Bacia do Rio Paranaíba. Fonte: Cobrape (2010).

5. TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM A TÉCNICA GEOFÍSICA

Neste item serão mencionados os trabalhos consultados a fim de atualizar da melhor maneira possível o estado da arte neste tipo de trabalho/pesquisa.

Gallas (2003) publicou o trabalho referente à prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos, particularmente a eletrorresistividade. Neste trabalho foram relacionadas zonas de baixa resistividade a fraturamentos que, por sua vez, são zonas potenciais para aquíferos em rochas cristalinas. A partir dessa correlação foram otimizados locais para execução de poços tubulares profundos que serviram como exploradores do recurso hídrico. Esta bibliografia fornece dados teóricos da eletrorresistividade, como fórmulas, esquemas e conceitos de campo que serviram de base para o Trabalho de Formatura. Gallas (2003) aborda o conceito de inversão, que é corretamente aplicado nas pseudo-seções de levantamento eletrorresistivo produzindo um modelo que se ajusta aos dados de campo. O trabalho foi realizado junto ao Laboratório de Geofísica Aplicada da Divisão de Geologia do IPT, atendendo ao pedido feito pela Prefeitura Municipal de São José do Rio Pardo.

Souza Filho *et al.* (2006) publicaram o trabalho sobre a interpretação e modelagens de dados de eletrorresistividade para a locação de poços tubulares em aquífero fissural, no nordeste brasileiro, mais precisamente em Juá, Irauçuba-CE. Foram utilizadas as técnicas de caminhamento elétrico e levantamento aerogeofísico eletromagnético para obtenção dos dados. Os dados brutos de resistividade aparente foram plotados nas pseudo-seções e invertidos por programas computacionais. Após as interpretações das seções foram indicados dois locais para perfuração de poços, sendo que um poço encontrou-se seco, já o outro explora água à vazão de 1250 L/h. O trabalho conclui que a geofísica é um método eficaz para a investigação de aquíferos em rochas cristalinas e que, a vazão de água fornecida pelo poço tem extrema relação com a capacidade de armazenamento das estruturas geológicas e existência de áreas de recarga hidráulica.

Xavier (2004) publicou o trabalho referente à aplicação da prospecção geofísica com ênfase no método de eletrorresistividade na locação de poços tubulares na Comunidade de Guamiranga, município de Araquari, SC. O contexto geológico é dominado por rochas cristalinas do embasamento gnáissico-granulítico, e devido à pobre potencialidade natural de armazenamento de água nessas rochas, o trabalho de Xavier (2004), assim como o de Gallas (2003), buscaram evidenciar descontinuidades através de valores de resistividades baixos com continuidade em profundidade. Foram utilizadas as técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE), sendo os arranjos usados Schlumberger e dipolo-dipolo, respectivamente. O trabalho ainda considerou os dados de 3 poços tubulares antes da execução do levantamento geofísico, e estes, conforme a vazão

de água fornecida, direcionaram os trabalhos geofísicos para a delimitação da estrutura geológica presente na região.

Oliveira (2011) aborda o tema da aplicabilidade do método geofísico de eletrorresistividade na pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas na região do “polígono das secas”, no nordeste. Através da execução de 37 SEVs, Oliveira (2011) mapeou, de forma indireta, aquíferos fissurais em rochas metamórficas, espessura do regolito e o contato entre a zona fraturada e não fraturada do embasamento. Com a junção das SEVs e inversão dos dados em programas computacionais, o trabalho de Oliveira (2011) apresentou seções nas quais ele otimizou os locais captação de recursos hídricos por meio de poços tubulares. Este trabalho ainda conclui que para calibrar os resultados das SEVs foram utilizados dados hidrogeológicos da região, poços previamente instalados e mapeamento de campo, assim como fotointerpretações para identificar estruturas favoráveis.

Mesquita (2013), em razão da solicitação da Prefeitura Municipal de Croatá-CE, publicou o relatório técnico com estudo geológico-geofísico para locação de poços tubulares profundos para a captação de água. O motivo da solicitação foi similar ao deste Trabalho de Formatura e das bibliografias citadas acima, que é determinar melhores estruturas geológicas, através da eletrorresistividade, relacionadas ao armazenamento de água. Entretanto, o contexto geológico abordado em Mesquita (2013), é bem diferente aos já citados. O município de Croatá possui uma geologia constituída por rochas sedimentares de idade paleozóica, compostas por arenitos grosseiros e conglomeráticos da Formação Serra Grande e por sedimentos aluvionares que aparecem como coberturas próximas às principais drenagens do município. Portanto, a porosidade que armazena água nesta situação é a primária. A metodologia utilizada nesta bibliografia foi dividida em três etapas, sendo a primeira a coleta de informação através dos poços já existentes na região e de mapas geológicos. A segunda etapa constituiu-se em aerofotointerpretações visando identificar as estruturas presentes na área. Já a terceira etapa constituiu-se em levantamentos de eletrorresistividade com a técnica SEV e arranjo do tipo Schlumberger. O sentido de investigação geofísica em Mesquita (2013) é vertical, pois as estruturas correlacionáveis aos potenciais aquíferos não se encontram mais na vertical, mas sim na horizontal, como a posição do nível d'água.

As bibliografias a seguir não estão diretamente ligadas à exploração de água, mas utilizaram o método eletrorresistivo como principal ferramenta de investigação e foram consultadas durante a elaboração deste Relatório de Progresso.

Gallas *et al.* (2000) realizaram o trabalho com ensaios geofísicos em apoio ao diagnóstico de recalque de solo em área urbana, ocorrido no município de Taubaté, São Paulo. Os métodos geofísicos utilizados foram o SP (Potencial Espontâneo) e eletrorresistividade com a técnica do CE com arranjo dipolo-dipolo. Os valores de resistividade baixos estão estritamente relacionados com os recalques diferenciais ocasionados na região, pois o processo de recalque está ligado à infiltração da água nos solos colapsáveis da Formação Pindamonhangaba, e a água presente nestes solos representa os valores baixos de resistividade. Os valores de resistividade foram apresentados em seções e em planta. Nas seções pôde-se evidenciar a variação dos estratos geoeletricos na vertical, enquanto o mapa de resistividade apresentou a área em planta em um determinado nível de investigação, que mostrou maior indício de recalque, pois apresentou menores valores de resistividade.

Campos *et al* (2005) publicaram o trabalho referente à utilização da eletrorresistividade na caracterização de arenitos fraturados do Grupo Itararé. O trabalho tinha como objetivos o mapeamento de fraturas e seu comportamento hidráulico, geometria das camadas e contato entre diferentes litologias. Para isso foram executadas 15 linhas de caminhamento elétrico com a abertura dos dipolos variando de uma linha para outra. Os resultados de resistividade aparente obtidos sofreram inversão 2D em programas computacionais específicos. Como conclusão, o trabalho conseguiu distinguir fraturas fechadas de fraturas abertas preenchidas por fluidos, contatos entre camadas e geometria das mesmas, como previa o objetivo do trabalho. Adicionalmente, através da eletrorresistividade, o trabalho também concluiu que apesar dos arenitos do Grupo Itararé apresentarem um enorme potencial de constituir aquíferos devido a sua porosidade e permeabilidade, estes não os constituem, pois as resistividades obtidas são da ordem de milhares de ohm.m, não condizente com rochas sedimentares em que os poros estão preenchidos por fluidos iônicos.

Moreira (2009), através da geofísica aplicada, monitorou uma determinada área de disposição de resíduos sólidos domiciliares, medindo os parâmetros físicos de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial natural através dos métodos geofísicos de Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo, respectivamente, por meio das técnicas de SEV e CE. O trabalho teve como objetivo o monitoramento de áreas em subsuperfície que podiam apresentar variações em determinados parâmetros físicos devido à presença de poluentes no solo. O local monitorado foi o aterro controlado municipal de Cordeirópolis (SP), em que foram feitas valas para disposição de lixo domiciliar. O trabalho propôs que a correlação entre baixa resistividade e alta cargabilidade está ligada à alta concentração de matéria orgânica (m.o.), e que a correlação baixa resistividade e baixa cargabilidade está ligada à baixa concentração de m.o., e que o parâmetro físico

resistividade próximo às valas só irá retornar ao nível normal após 12 anos. Outras correlações são feitas entre SP, Eh, pH e polarização induzida (IP) com a presença de matéria orgânica no solo.

Becegato *et al.* (2009) publicaram o trabalho de investigações geofísicas aplicadas ao lixão desativado do município de Saudade do Iguazu-PR, cujo objetivo era determinar a pluma de contaminação oriunda do depósito de lixo desativado através do método de eletrorresistividade com o uso do arranjo dipolo-dipolo. Segundo este trabalho, o método de eletrorresistividade é muito eficiente para a identificação da pluma de contaminação porque, quando o chorume (líquido negro oriundo dos materiais orgânicos em decomposição) está presente nas fraturas das rochas, caso da região, rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, os valores de resistividade são muito mais baixos do que nos locais em que o chorume e as fraturas não estão presentes. O trabalho ainda justifica o emprego do método da eletrorresistividade informando que a investigação geofísica é feita de forma indireta, não invasiva/destrutiva, sendo muito eficiente e econômica.

6. HIDROGEOLOGIA DOS AQUÍFEROS FISSURAIS

Define-se aquífero como uma porção geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais. A capacidade de um aquífero armazenar e transmitir água depende das propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e das propriedades do meio permeável (Manoel Filho 1997).

A natureza dos aquíferos é controlada pela litologia, pela estratigrafia e pela estrutura da porção geológica. A litologia trata da composição mineral, granulometria e do empacotamento dos sedimentos ou das rochas constituintes. A estratigrafia descreve as relações geométricas e cronológicas entre os vários elementos que compõe a porção geológica, tais como camadas, lentes, descontinuidade etc. A estrutura corresponde às características geométricas produzidas na porção geológica por deformação após deposição ou cristalização da litologia, como é o caso das juntas, fraturas, falhas etc. (Manoel Filho 1997).

As rochas que são importantes aquíferos são aquelas que apresentam de regular a boa permeabilidade. Permeabilidade é a propriedade de uma rocha permitir a passagem de fluidos através dela sem se deformar estruturalmente ou ocasionar deslocamento relativo de suas partes constituintes (Suguio 1980). Portanto, os argilitos, folhelhos, rochas ígneas e metamórficas não fraturadas não poderiam constituir aquíferos levando em conta somente os processos de sedimentação e cristalização, pois somente através destes mecanismos singenéticos a permeabilidade destas rochas seria praticamente nula. Os vazios

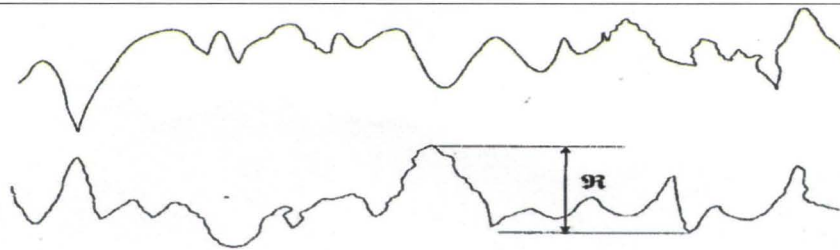
intercristalinos condicionantes da porosidade singenética (primária) são mínimos e não interconectados no caso destas rochas (Manoel Filho 1997).

Desta forma, no domínio das rochas cristalinas ígneas e metamórficas, a porosidade epigenética (secundária) desempenha papel fundamental na caracterização destas rochas como aquíferos. De acordo com Manoel Filho (1997), medidas de condutividade hidráulica de granitos em poços sem fraturas, geralmente fornecem valores de ordem de 10^{-11} m/s, já em poços em que a rocha cristalina encontra-se fraturada, o valor varia entre 10^{-1} e 10^{-2} m/s.

Na análise de fissuras para estudar as características hidrodinâmicas de um aquífero, conforme Costa & Silva (1997), devem ser considerados os seguintes elementos: abertura (a), rugosidade das paredes (R) e material do preenchimento das descontinuidades. Em suma, quanto mais abertas, menos rugosas e menos preenchidas são as fissuras que constituem a rocha, maior será a condutividade hidráulica da mesma.

Segundo os autores, abertura de uma fissura é definida como a medida de separação média entre as paredes rochosas ao longo do plano de quebraimento, e está relacionada com as tensões atuantes e o tipo de rocha. Rochas como gnaisses e migmatitos tendem a ter menos fissuras que filitos e ardósias, entretanto possuem fissuras de maior abertura. A rugosidade é definida como a distância entre duas linhas paralelas à linha média e que tangenciam a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda (figura 10). Adicionalmente, Barton (1975) *apud* Costa & Silva (1997) classifica as fissuras quanto à rugosidade em escalonada, ondulada e plana, e em cada uma dessas classes subdivide-se nas subclasses rugosa, lisa e polida. O material de preenchimento pode ser proveniente da rocha ou proveniente da interação dos fluidos com elementos exógenos à rocha. Segundo Costa & Silva (1997), a origem dos materiais pode estar ligada aos fragmentos da própria rocha fissurada, detritos de origem superficial, recristalização de sais que precipitam em soluções e ascensão de soluções hidrotermais mineralizantes.

Costa & Silva (1997) enumeram outros fatores que atuam na capacidade do aquífero fissural e na qualidade da água. Os autores dividem estes fatores em dois grupos principais: exógenos e endógenos. Os fatores exógenos dizem respeito aos condicionantes relacionados aos agentes atuantes na superfície terrestre, como o clima, relevo, hidrografia, vegetação, infiltração de soluções e intemperismo. Os fatores endógenos dizem respeito aos condicionantes que atuam na crosta, tais como as fissuras (mencionadas anteriormente), composição da rocha e soluções mineralizantes hidrotermais.



Classe	Escala		Perfil Típico de Rugosidade da Descontinuidade
	Intermédia	Menor	
I	Escalonada	Rugosa	
II		Lisa	
III		Polida	
IV	Ondulosa	Rugosa	
V		Lisa	
VI		Polida	
VII	Plana	Rugosa	
VIII		Lisa	
IX		Polida	

Figura 10. Perfis típicos de rugosidade. Fonte: Costa & Silva (1997). Editado.

Manoel Filho (1997) comenta que poucas tarefas em hidrogeologia são mais difíceis do que a locação de poços em rochas ígneas e metamórficas, pois existe uma grande incógnita que é a identificação das relações objetivas entre propriedades hidráulicas e geométricas do meio fissural com os dados de investigações não invasivas. Neste ponto entra como grande ajuda a eletrorresistividade.

Outra dificuldade é o estudo do fluxo através do meio fissurado, que obedece às leis de escoamento que, por sua vez, são funções do regime de escoamento a que está submetida a fratura. Costa & Silva (1997) explicam de forma detalhada e não trivial as leis que regem o escoamento em meios fissurados.

7. MATERIAIS E METODOLOGIA

7.1. Materiais

Os materiais utilizados no campo foram: resistímetro (ABEM), eletrodos, bobinas, fios, fitas adesivas, marretas, água com sal dissolvido, fontes e GPS (Etrex). Os softwares utilizados para a confecção deste relatório foram: RES2DINV, Surfer 8, ArcMap 10, Google Earth e Inkscape. As coordenadas do GPS foram tiradas em UTM segundo o datum WGS 1984 World Mercator.



Figura 11. Equipamentos utilizados em campo.

7.2 Métodos

As rochas são compostas por minerais e estes apresentam composições e estruturas cristalográficas extremamente diversas, contribuindo para que exista um campo quase infinito de heterogeneidades/anisotropias dentro de uma mesma rocha. Alguns minerais conduzem eletricidade via passagem de elétrons, como os metais nativos, sulfetos metálicos e a grafita (Kearey *et al.* 2009). Entretanto, a grande maioria dos minerais que compõe uma rocha é isolante e a corrente elétrica que é conduzida pela rocha ocorre por processos eletrolíticos através dos íons presentes nos fluidos que preenchem seus poros.

Tabela 1. Relação do conteúdo iônico dissolvido em fluidos com a eletrorresistividade. Fonte: Gallas (2002). Apostila Eletrorresistividade – Disciplina Geofísica Aplicada. Editada.

Resistividade das Águas (Ohm.m)	
Água do solo	1 a 100
água da chuva	30 a 1000
Água do mar	0,2
Gelo	10 ⁵ a 10 ⁸
Resistividade de Litologias Abaixo do Nível d'Água (Ohm.m)	
Ígneas e metamórficas	100 a 10000
Sedimentos consolidados	10 a 100
Sedimentos inconsolidados	1 a 100
Resistividade de Eletrólitos - Conteúdo de Sais (Ohm.m)	
0,005 g/l	1050
0,1 g/l	110
0,6 g/l	12

Desta forma, o comportamento elétrico da rocha vai depender de fatores como a condutividade da matriz rochosa, porosidade, textura e resistividade do líquido intersticial (Miranda *et al.* 2000). Segundo Archie (1942) e Kearey *et al.* (2009), a porosidade é o principal controle de resistividade nas rochas, e geralmente, quanto menos porosa é a rocha, maior é sua resistividade. Entretanto, quando se é abordado o conceito de porosidade deve-se levar em conta outros fatores, como o grau de compactação, conexão entre os poros, trama dos grãos, grau de cimentação, presença de fraturas etc. Estes fatores mencionados podem tornar uma rocha sedimentar menos porosa do que uma rocha cristalina e, portanto, mais resistiva. A figura 12 ilustra esta situação.

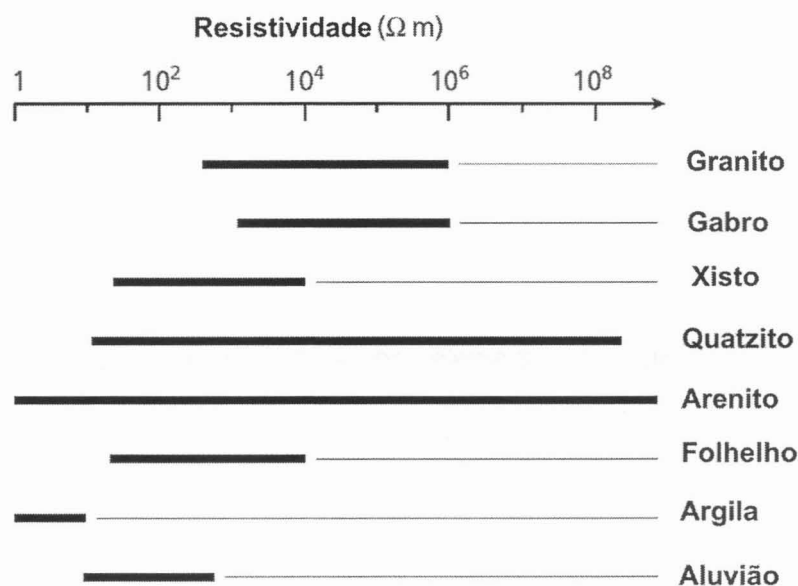


Figura 12. Faixa média das resistividades das principais rochas. Fonte: Kearey *et al.* (2002). Editado.

Partindo destas propriedades, é necessário um método que possibilite a identificação das heterogeneidades das rochas, assim como a identificação de rochas que apresentam porosidade preenchida por fluidos em contraste com as rochas que possuam uma porosidade baixa ou não preenchida por fluidos. É necessário um método que evidencie tais propriedades, pois estas estão extremamente ligadas às rochas que constituem aquíferos, que é foco deste trabalho.

Deste modo, o método escolhido foi a eletrorresistividade, que irá estabelecer as possíveis correlações entre as resistividades medidas e a presença de zonas fraturadas - potenciais aquíferos.

7.2.1. Eletroresistividade

Segundo Miranda *et al.* (2000), a resistividade elétrica é a propriedade dos materiais que quantifica a relação que existe entre o campo elétrico aplicado e a densidade de corrente que percorre a unidade de volume desse material.

De acordo com Kearey *et al.* (2009), o método de eletroresistividade é usado para observar heterogeneidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas dos corpos rochosos (alteração, fraturamento, saturação), assim como delimitar a influência de corpos altamente condutivos. O método também vem sendo muito utilizado na área ambiental e da engenharia para investigar a hidrogeologia da superfície relativamente rasa.

Este método usa uma fonte artificial que gera uma corrente elétrica (I) no subsolo por meio de eletrodos (A e B) em contato galvânico com o solo (Gallas 2003). É possível medir a diferença de potencial (ΔV) gerada pela corrente por meio de outro par de eletrodos (M e N) relativamente próximos do primeiro par, possibilitando o cálculo da resistividade aparente (ρ) ou efetiva do subsolo (Gallas 2003). De maneira simplista, a resistividade pode ser definida como a dificuldade da corrente elétrica de se propagar em determinado material (Braga 2007). A figura 13 mostra a disposição dos elementos descritos.

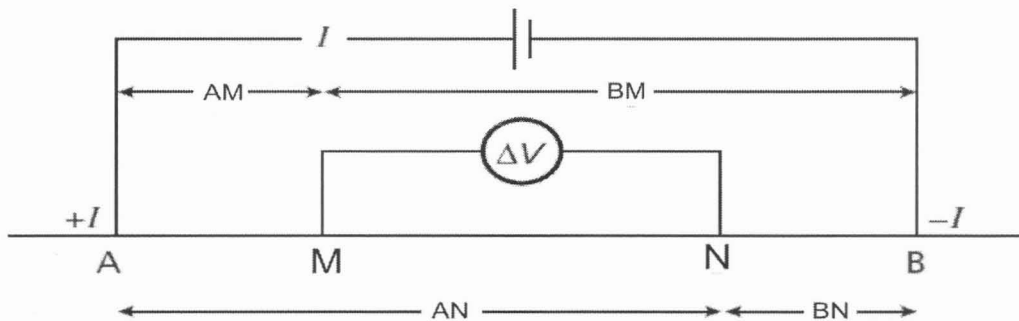


Figura 13. Forma geral da configuração de eletrodos usada em medições de eletroresistividade. Fonte: Kearey *et al.* (2002). Editado.

Pela lei de Ohm tem-se:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad \text{Equação. 01}$$

Onde r é a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido. Então, tem-se que os potenciais nos eletrodos M e N, respectivamente, serão dados por:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad \text{Equação. 02}$$

$$V_N = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad \text{Equação. 03}$$

O dado obtido no aparelho que mede o ΔV entre os eletrodos MN é: ΔVMN = VM– VN. Portanto, a fórmula fica:

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad \text{Equação. 04}$$

Por fim, segundo Gallas (2003) e Braga (2007), pode-se então calcular o valor da resistividade aparente do pacote rochoso ou solo investigado conforme as seguintes equações:

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I} \quad \text{Equação. 05}$$

onde:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad \text{Equação. 06}$$

Tabela 2. Informações pertinentes das grandezas até aqui mencionadas, como seus símbolos e unidades.

Grandeza	Símbolo	Unidade (S.I.)
Corrente elétrica	<i>I</i>	Ampere
Tensão elétrica	Δ <i>V</i>	Volt
Resistividade	<i>ρ</i>	Ohm.m
Comprimento	<i>m</i>	Metro
Fator Geométrico	K	Metro

De acordo com Gallas (2003) e Braga (2007), vale salientar que os dados de resistividades obtidos a partir dos cálculos e das medições são referentes a resistividades aparentes, pois o solo, na prática, não é homogêneo, e a quantidade medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras do volume de material que o constituem em subsuperfície.

Em suma, o método de eletrorresistividade consiste, na prática, em introduzir uma corrente elétrica controlada no solo, e através das fórmulas já citadas, calcular o valor da resistividade aparente dos materiais geológicos.

Ainda sobre este método, existem dois tipos principais de procedimentos de investigação em que ele é empregado: sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento

elétrico (CE) conforme Gallas (2003) e Kearey *et al.* (2009). Estes serão detalhados a seguir.

7.2.1.1 – Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Segundo Gallas (2003), Braga (2007) e Kearey *et al.* (2009), a sondagem elétrica vertical é mais empregada no intuito de se observar as variações verticais dos substratos geológicos, como topo rochoso, zona saturada em água etc. O procedimento é aumentar sucessivamente a abertura entre os eletrodos de corrente AB e mantendo-se fixos (na medida do possível) os eletrodos de potencial MN. Assim, à medida que se aumenta a abertura AB, aumenta-se a penetração do campo elétrico e, conseqüentemente, a profundidade de investigação (figura 14).

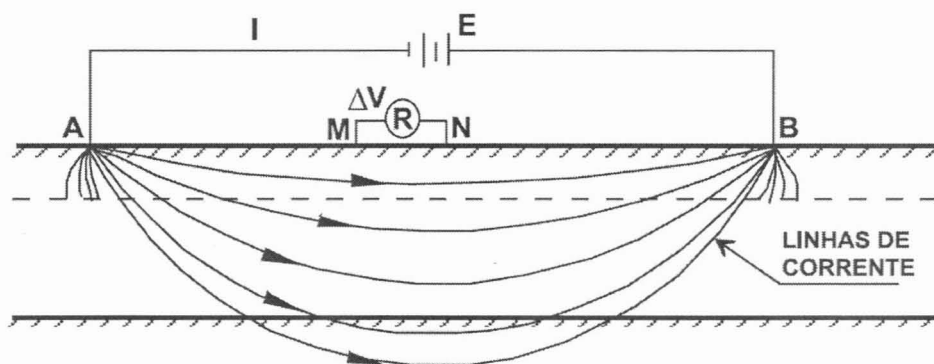


Figura 14. Disposição dos elementos e o princípio do método da eletrorresistividade. Fonte: Gallas (2003).

O principal arranjo para a execução de SEVs é o Schlumberger, porém não foram feitas SEVs neste Trabalho de Formatura. Assim, maiores detalhes para este arranjo não serão abordados aqui.

7.2.1.2. Caminhamento de Elétrico (CE)

Conforme Kearey *et al.* (2009), esta técnica é preferencialmente utilizada para identificar anomalias resistivas causadas por estruturas geológicas verticais como, falhas, fraturas, zonas de cisalhamento diques etc. Por isso optou-se por esse procedimento no desenvolvimento desse trabalho, já que a rocha encontrada na região é cristalina e a presença de água nestas situações está intimamente ligada à porosidade secundária (fraturas).

Para executar este procedimento, a distância entre os eletrodos de correntes (AB) e os de tensão (MN) foram iguais e constantes (conforme é estabelecido para o arranjo dipolo-dipolo) durante todo o levantamento geofísico, sendo estes movidos ao longo de um perfil na superfície do terreno com direção previamente estabelecida e de forma retilínea,

podendo ser analisadas diferentes profundidades. Os dados obtidos relacionam-se entre si na forma de perfis (seções ou pseudo-seções), com várias profundidades de investigação e, a partir destes, também podem ser elaborados mapas de resistividade com níveis de investigação distintos.

Arranjo Dipolo-Dipolo

Como detalhado em Gallas (2003), no arranjo dipolo-dipolo os eletrodos A e B (eletrodos de corrente) e os eletrodos M e N (eletrodos de potencial) são alinhados em um mesmo perfil. O arranjo é definido pelos espaçamentos $L=AB=MN$, e a profundidade de investigação cresce conforme o nível de investigação (n).

A vantagem deste arranjo é possibilitar a medida da resistividade em várias profundidades. As medidas são atribuídas nas intersecções das linhas que partem a 45° dos centros dos eletrodos AB e MN. A cada medida, os dipolos MN são deslocados a uma distância L no perfil, possibilitando a aquisição das resistividades em novas profundidades. Quando atingida a profundidade máxima teórica desejada de coleta das resistividades, os eletrodos AB são deslocados a uma distância L no perfil, começando uma nova série de medidas (figura 15).

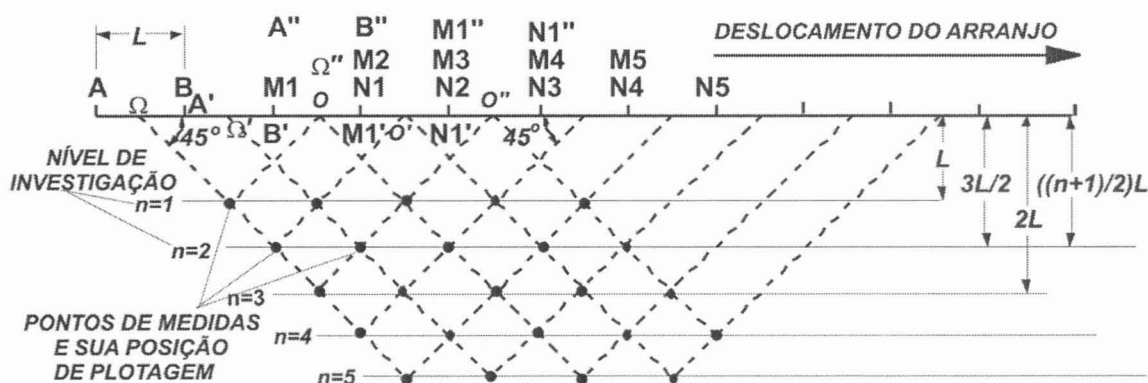


Figura 15. Caminhamento Elétrico (CE). Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo. Fonte: Gallas (2003).

Ao fim, com a interpolação dos dados é possível gerar uma pseudo-seção de resistividade aparente. Gallas (2003) mostra algumas seções reais como exemplos. Ainda nesta literatura, é extremamente recomendável que se conheça previamente a geologia do local de estudo para a melhor escolha da direção do caminhamento elétrico, para que se intercepte de melhor maneira as estruturas verticais presentes. Adicionalmente, Gallas (2003) sugere, para a otimização dos resultados, que a abertura entre os dipolos seja tal, que a partir de, no máximo o segundo nível de investigação, já se tenha passado a camada de alteração superficial (solo + rocha alterada).

Foram levantadas 4 linhas de investigação de eletrorresistividade denominadas linhas A, B, C e D (figura 1). Estas possuem extensões de 720 m, 720 m, 660 m e 720 m, respectivamente, somando um total de 2820 m de investigação linear. Todos os perfis atingiram 6 níveis de investigação e possuíram abertura entre os dipolos de $AB = MN = 30$ m. A profundidade máxima teórica investigada foi de 105 m.

7.2.2. Inversão dos Dados

A pseudo-seção de resistividade aparente adquirida por meio dos processos explicados no subitem anterior não apresenta o valor “real” da resistividade devido à geometria da configuração dos eletrodos empregada e por razão da anisotropia do subsolo investigado. Deste modo, para obter-se uma seção com os dados “reais” de resistividade é necessário aplicar a técnica de inversão de dados, que na teoria, é uma técnica que permite uma aproximação condizente, através de modelos matemáticos, para diversas estruturas geológicas (Gallas 2003). Para realizar-se a inversão dos dados foi usado o programa RES2DINV.

O programa RES2DINV é um software, distribuído pela Geotomo Software, que determina automaticamente um modelo de resistividade em subsuperfície em duas dimensões através de medidas adquiridas em investigações elétricas (Manual Geotomo Software 2010). O modelo utilizado por este programa de inversão consiste em um número de retângulos de resistividade calculados a partir dos dados de campo (figura 16). A distribuição e o tamanho dos retângulos são automaticamente gerados pelo programa usando a distribuição dos *data points* da pseudo-seção como um guia. A profundidade da superfície inferior que delimita os blocos gerados é aproximadamente equivalente à profundidade de investigação adquirida pelos eletrodos que possuem a maior abertura (Edwards 1977).

Segundo o Manual Geotomo Software (2010), o programa RES2DINV usa um modelamento de subrotina avançado para calcular a resistividade aparente e uma otimização não linear do método dos mínimos quadrados para a rotina de inversão das resistividades. Powers *et al.* (1999) explicam a fórmula utilizada. Idealmente, as técnicas utilizadas por este programa produzem um modelo de subsuperfície 2D isento das distorções observadas na pseudo-seção de resistividade aparente causadas pela geometria do arranjo dielétrico usado (Gallas 2003).

ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS

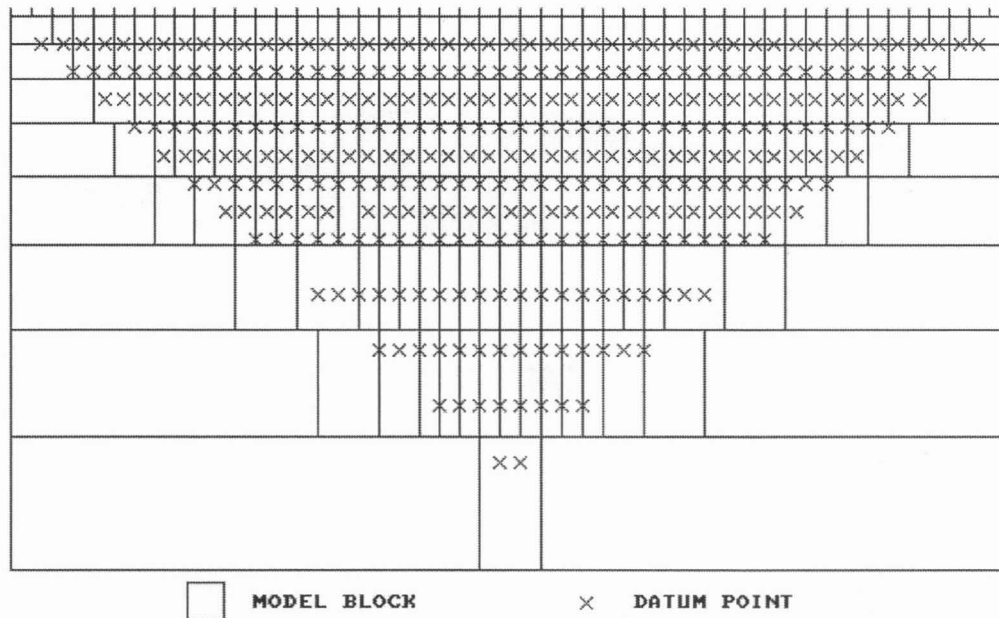


Figura 16. Distribuição dos retângulos gerados pelo programa RES2DINV conforme os *data points da seção*. Os retângulos de resistividade são gerados automaticamente. Fonte: Manual Geotomo Software (2010).

8. RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos levantamentos geofísicos foram elaboradas seções modeladas de resistividade no programa computacional de inversão RES2DINV. Estas seções modeladas de resistividade estão apresentadas nas figuras 17, 18, 19 e 20 deste trabalho, assim como as pseudo-seções de resistividade aparente. Ambas foram interpoladas pelo método dos mínimos quadrados no programa Surfer 8.

Através dos levantamentos geofísicos e dos dados obtidos das seções modeladas, também foram gerados mapas de resistividades em níveis/profundidades (n) de investigação distintos. Os mapas estão apresentados nas figuras 21 e 22, e aperfeiçoaram a interpretação da continuidade das anomalias de baixa resistividade. Os mapas foram gerados no programa Surfer 8 e interpolados pelo método de Krigagem.

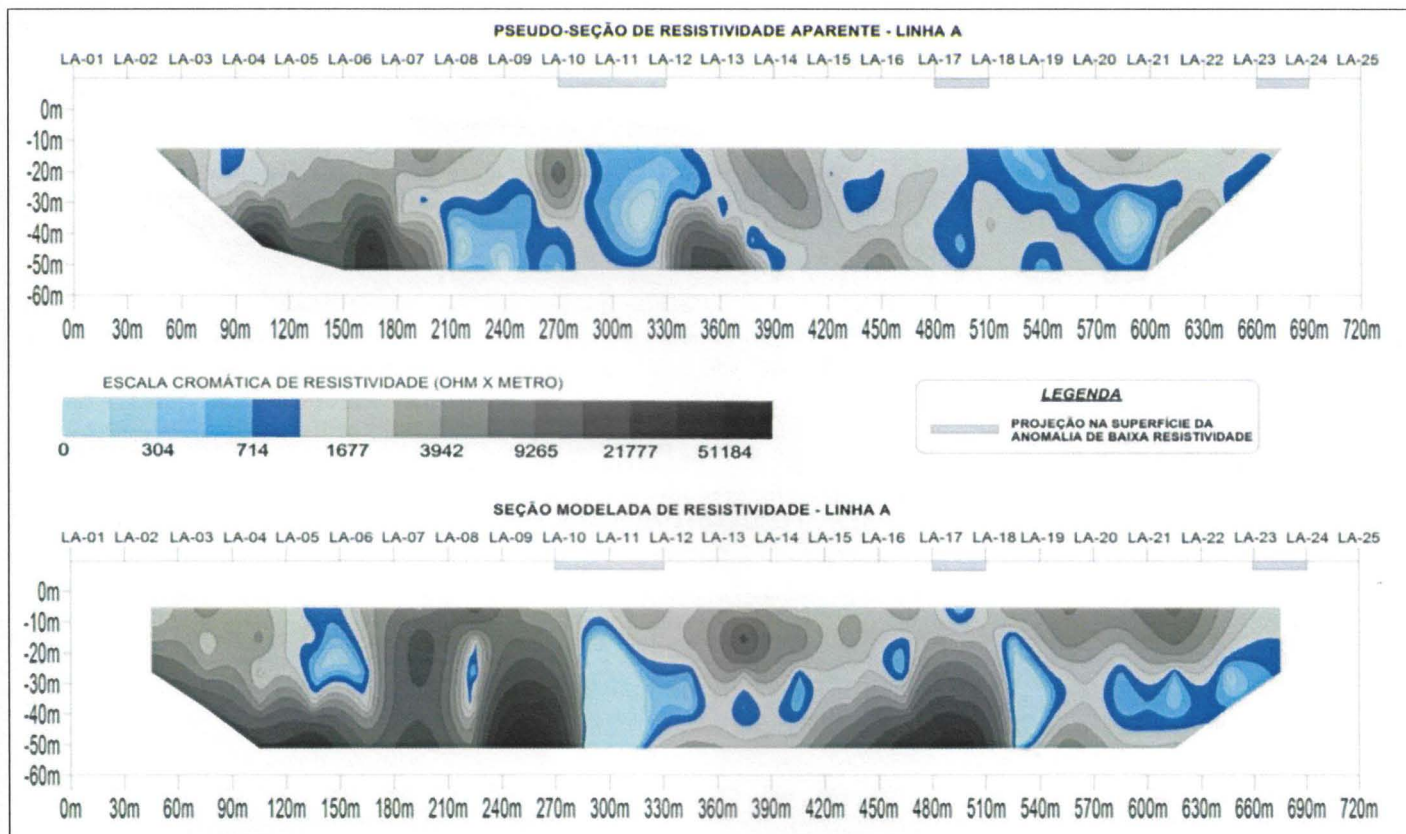


Figura 17. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha A.

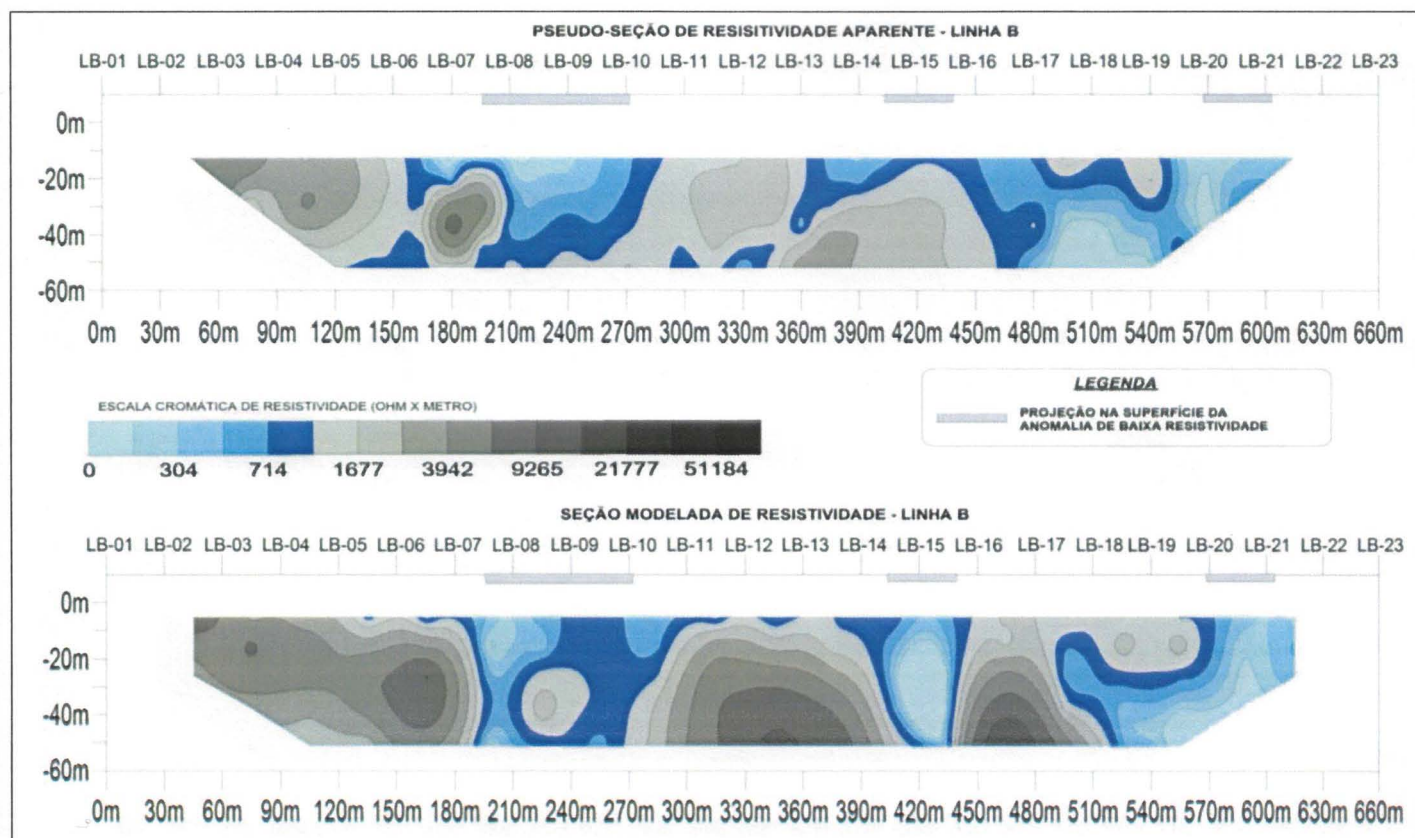


Figura 18. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha B.

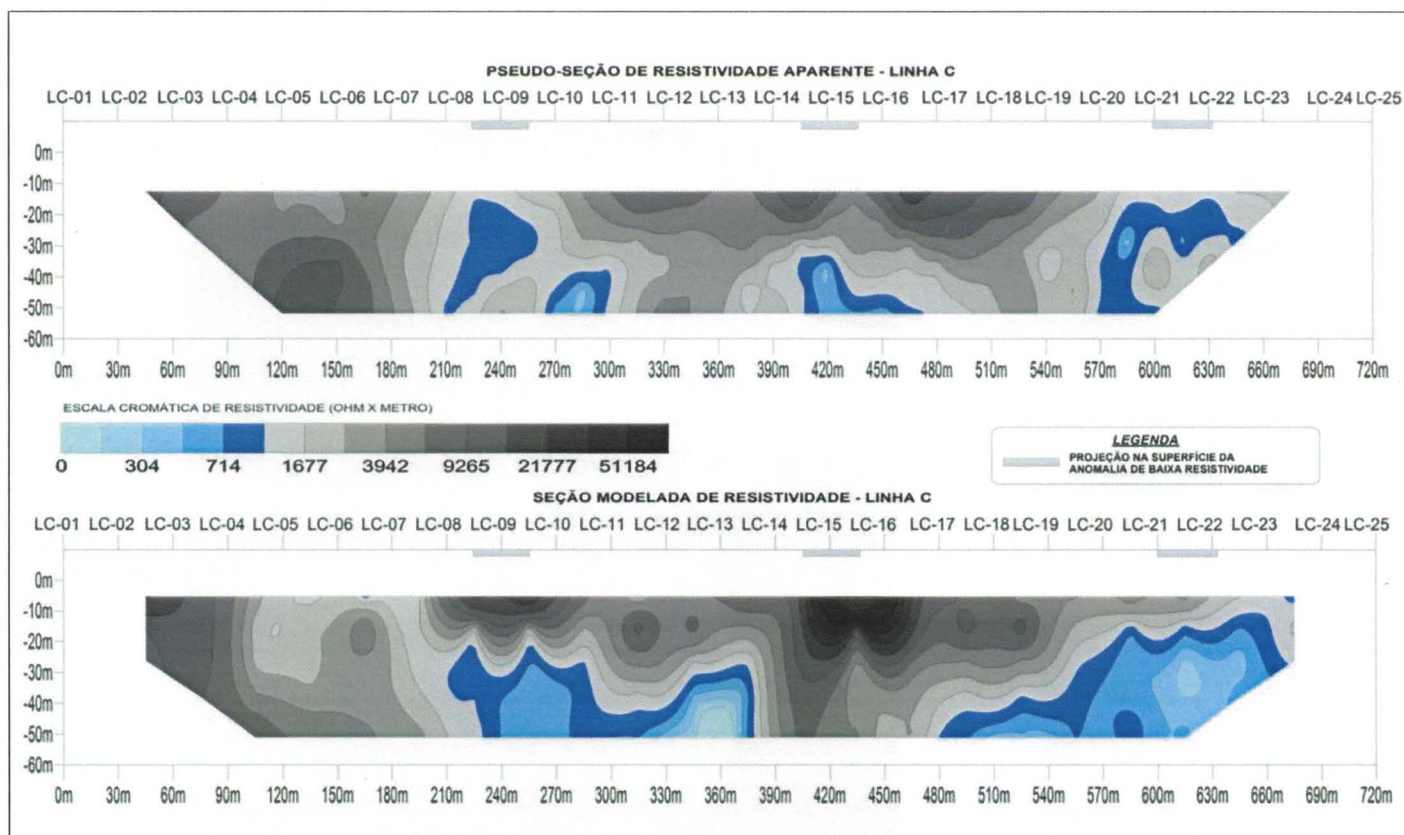


Figura 19. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha C.



Figura 20. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade da Linha D.

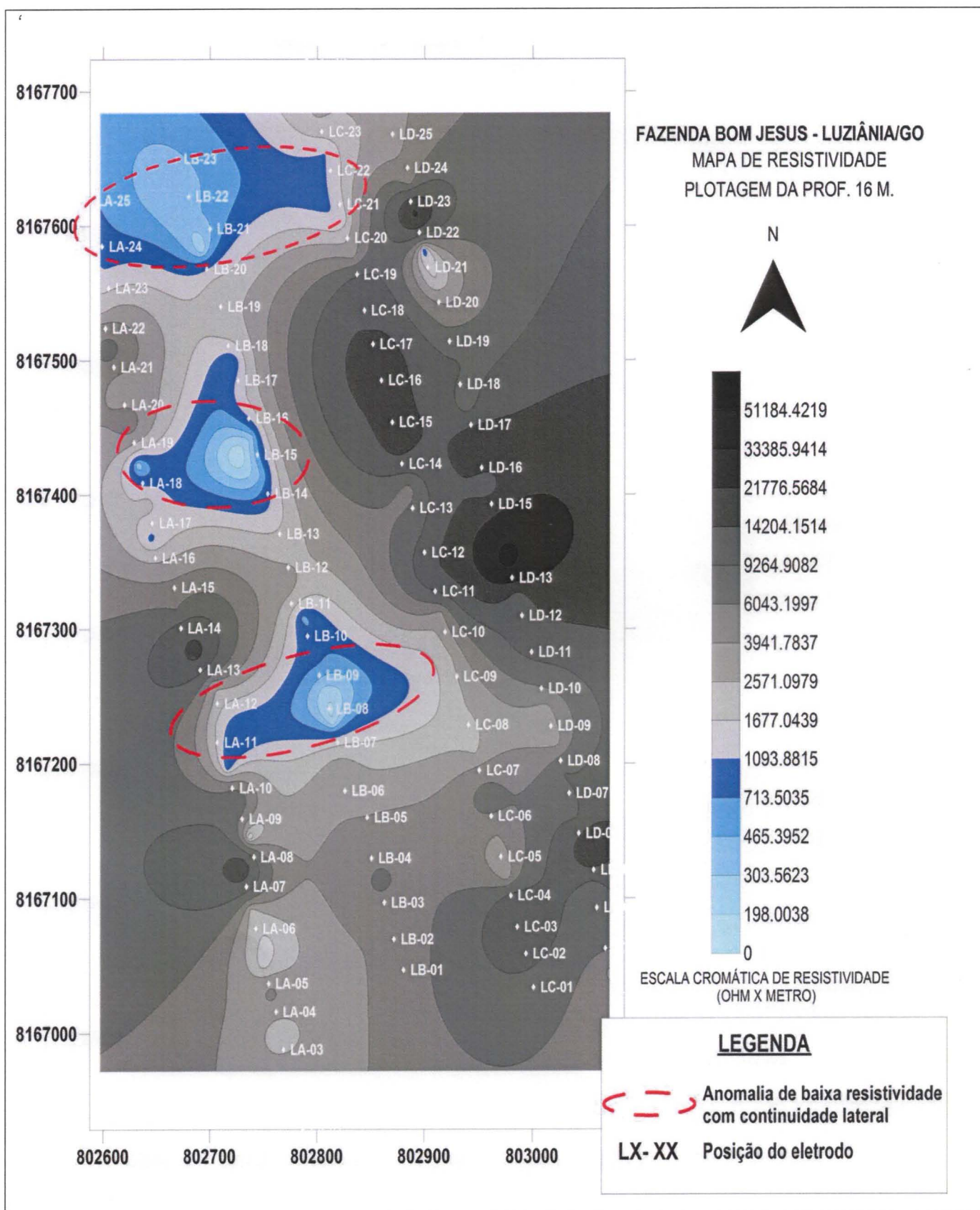


Figura 21. Mapa de resistividade do nível 2 de investigação, teoricamente correspondente à profundidade de 16m das seções modeladas de resistividade.

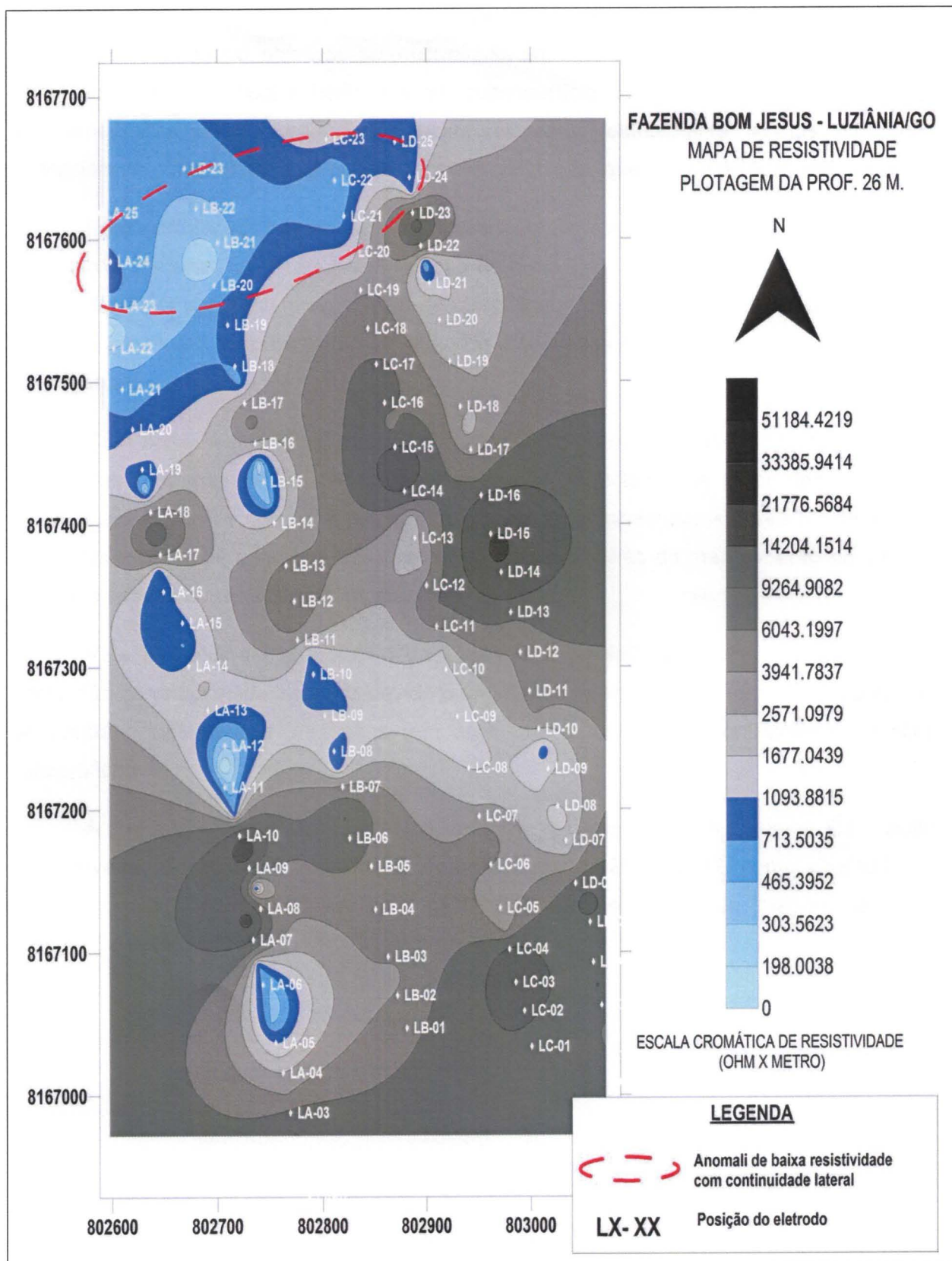


Figura 22. Mapa de resistividade do nível 3 de investigação, teoricamente correspondente à profundidade de 26m das seções modeladas de resistividade.

9. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nas seções e mapas de resistividades gerados, juntamente com observações de campo, objetivou-se a correlação entre as anomalias de baixa resistividade com continuidade vertical e horizontal em subsuperfície com as possíveis estruturas de fraturamento/fallhamento, pois estas estruturas estão estritamente ligadas às zonas potenciais de constituírem aquíferos em rochas cristalinas, que é caso da área estudada.

Esta correlação é baseada no fato de que as zonas rúpteis podem apresentar percolação preferencial de água em relação às partes não fraturadas da rocha. Portanto, estas estruturas apresentam anomalias de resistividade baixa devido à maior alteração dos minerais presentes na zona fraturada e devido à presença de fluidos iônicos gerados pela interação água-rocha.

Com base nestes fatos, foram assinaladas nas figuras das pseudo-seções, seções modeladas e mapas de resistividade as anomalias detectadas. A partir das anomalias assinaladas é que se conclui a locação do poço tubular profundo. A figura 23 mostra de forma sistemática as principais interpretações obtidas através do mapeamento de campo, mapas e seções de resistividade modeladas.

Vale salientar a interpretação da anomalia assinalada em vermelho na figura 23 como não correlacionada à fratura devido o fato desta se encontrar em um alto topográfico, ao contrário das demais anomalias (em azul) que sempre se encontravam em baixos topográficos.

A provável razão desta anomalia é interpretada como contraste litológico. Esta feição é observada aflorando na linha D entre os eletrodos LD-21 e LD-22, como analisado na seção modelada de resistividade da linha D (figura 20) e através da imagem aérea do Google Earth (figura 24).

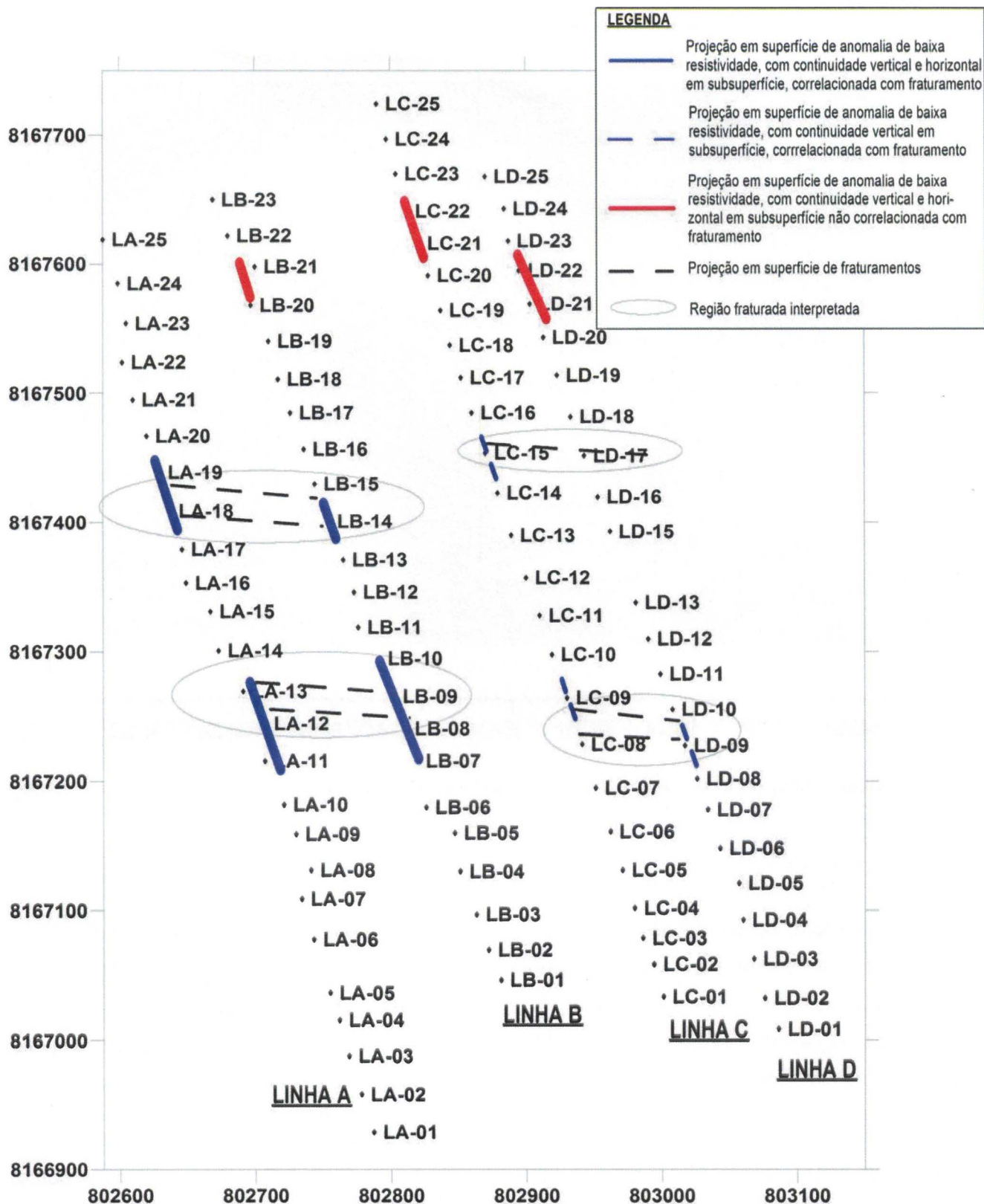


Figura 23. Principais interpretações obtidas através do levantamento geofísico e mapeamento em campo.

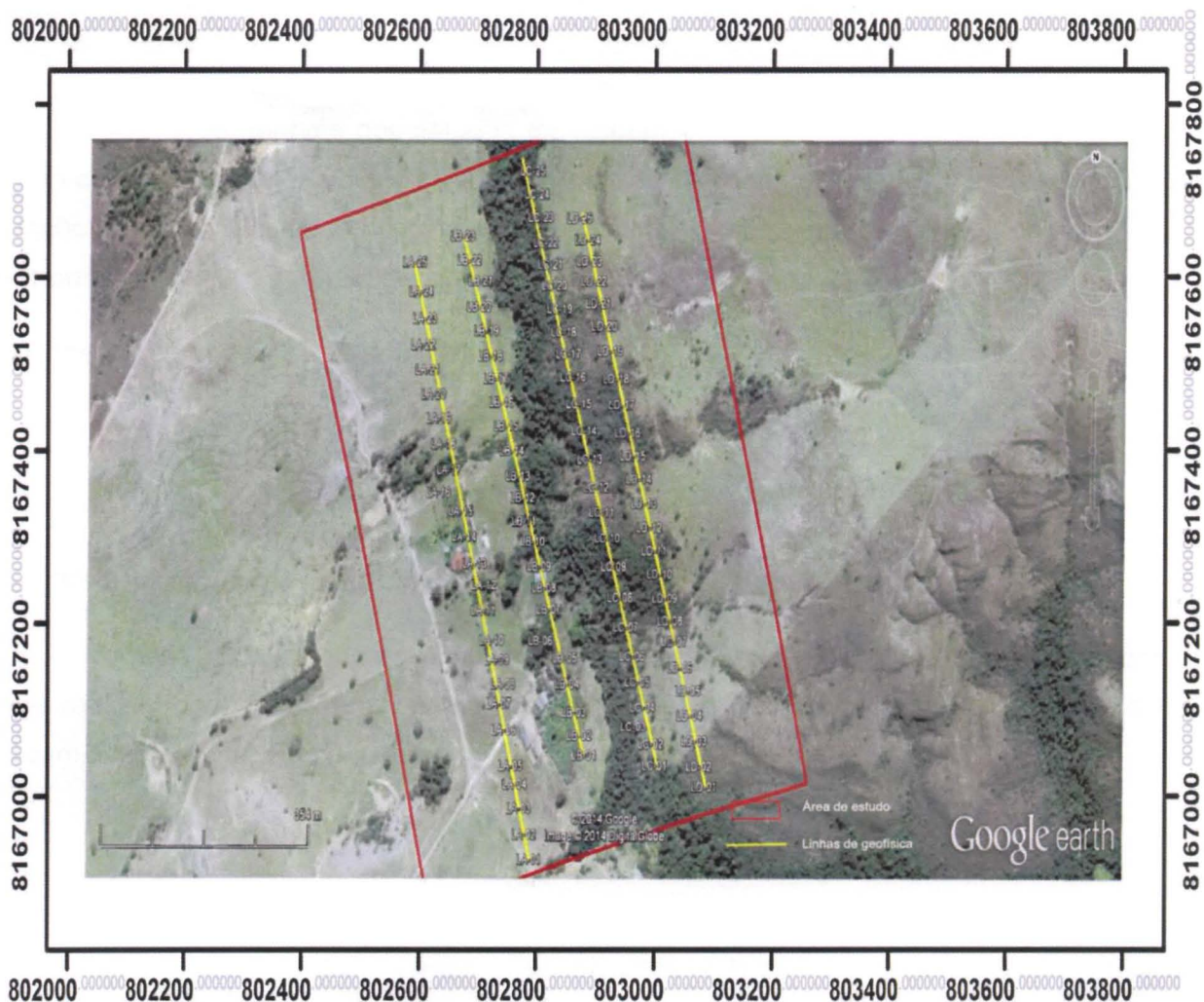


Figura 24. Área de estudo com coordenadas em UTM segundo o datum WGS 1984 - World Mercator. Quadrícula 22 K. Fonte: Google Earth.

10. CONCLUSÕES

O método de eletrorresistividade utilizado para otimizar a locação de poços é um método indireto e não invasivo que permite, através dos contrastes geoeletricos, interpretar feições geológicas reais. Partindo desde princípio, é importante correlacionar os dados obtidos através do levantamento elétrico de forma mais realista possível com a geologia, consultando a literatura devida e trabalhos prévios que se utilizaram do método.

Consequentemente, através da eletrorresistividade é possível reduzir o custo e o tempo envolvidos na prospecção de aquíferos, pois esta técnica auxilia na escolha do local para exploração de um poço, já que, através das seções e mapas de resistividade é possível mapear zonas fraturadas onde ocorre o fluxo de água, assim como suas continuidades verticais, horizontais e interconexões.

Adicionalmente, deve-se ressaltar a importância do conhecimento prévio da área de estudo. Através deste conhecimento é que se escolhe a estruturação do levantamento

geoelétrico, como a direção das linhas, tamanho da malha, espaçamento dos eletrodos etc. A escolha equivocada de um destes parâmetros pode comprometer todo o trabalho.

Finalmente, através dos estudos de eletrorresistividades realizados neste trabalho, foram selecionados os melhores locais para locação de poços tubulares levando em conta a relação: zonas fraturadas capazes de transmitir água e anomalias negativas de eletrorresistividade. São eles, em ordem decrescente de prioridade:

- 1) Entre os eletrodos 7 e 10 da Linha B;
- 2) Entre os eletrodos 11 e 13 da Linha A;
- 3) Entre os eletrodos 14 e 15 da Linha B;
- 4) Entre os eletrodos 18 e 19 da Linha A.

Pode-se concluir que os objetivos estabelecidos neste trabalho foram alcançados, uma vez que foram detectadas anomalias que permitiram indicar as possíveis estruturas que podem abrigar os aquíferos fraturados em subsuperfície.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ARCHIE, G. E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, **146**:54 –62.
- ARCMAP 10. Aplicação usada no ArcGis que representa informações geográficas na forma de coleções de *layers* e outros elementos de mapa.
- BECEGATO, V. A., STEFANATO, R., FERREIRA, F. J. F., CUNHA, J. U., CABRAL, J. B. P. 2009. Investigações geofísicas aplicadas no lixão desativado do município de Saudade do Iguaçu – SP. *Revista Geográfica Acadêmica*, **3**(1):47-55.
- BRAGA, A. C. O. 2007. *Modulo: Métodos geoelétricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia Aplicada. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 79p.
- COBRAPE. 2010. Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba – Parte A. *In*: Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, ANA – Agência Nacional de Águas, 417p.
- COSTA, W. D., SILVA, A. B. 1997. Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. *In*: FEITOSA, F. A. C. & FILHO J. M. *Hidrogeologia: Conceito e Aplicações*. Fortaleza, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, p.133-174.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2000. Mapa geológico de Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2008. Mapa geológico de Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000
- CAMPOS, A. F., RIGOTI, A., ROSTIROLLA, S. P., APPI, C. J., KRAFT, R. P., BARTOSZECK, M. K. 2005. Utilização da eletrorresistividade na caracterização de arenitos fraturados do Grupo Itararé – Bacia do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, (56):89-103.
- EDWARDS, L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, **42**(5):1020-1036.
- FISCHEL D. P., PIMENTEL, M. M., FUCK R. A., ARMSTRONG, R. 2001. U-Pb SHRIMP and Sm-Nd geochronology of the Silvânia Volcanics and Jurubatuba Granite: juvenile Paleoproterozoic crust in the basement of the Neoproterozoic Brasília Belt, Goiás, central Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **73**(3):445-460.

- FONSECA, M. A., DARDENNE, M. A., UHLEIN, A. 1995. Faixa Brasília Setor Setentrional: estilos estruturais e arcabouço tectônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **25**(4):267-278.
- GALLAS, J. D. F. 2003. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com emprego de métodos indiretos. *Revista do Instituto Geológico*, **24**(1/2):43-51.
- GALLAS, J. D. F., SANTORO, E., MESQUITA, N. N., DINIZ, H. N., SOUZA, L. A. P. 2000. Ensaio geofísico em apoio ao diagnóstico de recalque de solo em área urbana ocorrido no município de Taubaté – SP. *In: XXXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. p.1-7.
- GOOGLE EARTH 2014. Programa desenvolvido e distribuído pela empresa Google cuja função é apresentar um modelo tridimensional do globo terrestre proveniente de imagens de satélites.
- INKSCAPE. Editor de gráficos vetoriais de código aberto para Windows, MAC OSX e Linux.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. 2002. Electrical surveying. *In: KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. An introduction to geophysical exploration*. UK, Black Science, p. 183-196.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. 2009. Levantamento elétrico. *In: KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. Geofísica de exploração*. São Paulo, Oficina de Textos, p. 315-340.
- LAUX, J. H. 2004. *Evolução do Arco Magmático de Goiás com base em dados geocronológicos U-Pb e Sm-ND*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília (DF), 98p.
- MANOEL FILHO, J. 1997. Ocorrência das águas subterrâneas. *In: FEITOSA, F. A. C. MANOEL FILHO J. Hidrogeologia: Conceito e Aplicações*. Fortaleza, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, p.13-33.
- MANUAL GEOTOMO SOFTWARE. 2010. RES2DINV ver. 3.59. for Windows XP/Vista/7.
- MATTOS, S. C. 2000. Estado atual e necessidade de gerenciamento das bacias hidrográficas dos rios Meia Ponte, Corumbá, e dos Bois, Estado de Goiás. *In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, p. 1-6.
- MESQUITA, C. J. 2013. *Relatório Técnico – Estudo geológico-geofísico para locação de poços tubulares profundos para a captação de água*. CCGeo – Consultoria Serviços, 8p.
- MIRANDA, J. M., LUIS, J. F., COSTA, P. T., SANTOS, F. M. 2000. *Manual de Fundamentos de Geofísica*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 173p.

- MOREIRA, C. A. 2009. *Geofísica aplicada no monitoramento de área de disposição de resíduos sólidos domiciliares*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 169p.
- NAVARRO, G. R. B., ZANARDO, A., SIMÕES, L. S. A. 2007. Rochas metamáficas associadas ao Arco Magmático de Goiás na região de Pontalina – GO. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(4):18-27.
- OLIVEIRA, M. A. S. 2011. *Aplicabilidade do método geofísico de eletrorresistividade na pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas na região de Conceição do Coité – BA*. Trabalho Final de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 67p.
- PIMENTEL, M. M., FUCK, R. A. 1994. Geocronologia Rb-Sr da porção sudoeste do Maciço de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, **24**(2):104-111.
- POWERS, C. J., SINGHA, K., HAENI, F. P. 1999. Integration of Surface Geophysical Methods for Fracture Detection in Bedrock at Mirror Lake, New Hampshire. In: MORGANWALP, D. W. & BUXTON, H. T. (eds.) *U.S. Geological Survey Toxic Substances Hydrology Program -- Proceedings of the Technical Meeting*. USGS Water-Resources Investigations Report. South Carolina, v. 3, p. 757-768.
- RES2DINV. Programa computacional distribuído pela Geotomo Software Malaysia cujo objetivo é determinar um modelo de resistividade em 2D em subsuperfície através do levantamento elétrico.
- SILVA, C. H., SIMÕES, L. S. A., KRYMSKY, R., MACAMBIRA, M. J. B. 2006. Proveniência e idade do metamorfismo das rochas da Faixa Brasília, na região de Tapira (SW de Minas Gerais). *Revista do Instituto de Geociências - USP*, São Paulo, **6**(1):53-66.
- SILVA, L. G. 2006. *Metodologia geofísica para discriminação de corpos intrusivos na Província Alcalina do Alto do Paranaíba – MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília (DF), 78p.
- SOUZA FILHO, O. A., OLIVEIRA, R. G., RIBEIRO, J. A., VERÍSSIMO L. S., SÁ, J. U. 2006. Interpretações e modelagens de dados de eletrorresistividade para locações de poços tubulares no aquífero fissural da área-piloto Juá, Irauçuba – Ceará. *Revista Geológica*, **19**(1):7-21.
- SOUZA, K. R. 2006. *Usos da água e ações antrópicas em Cocalzinho de Goiás e Corumbá de Goiás: Subsídios para a gestão do Rio Corumbá*. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 225p.

SUGUIO, K. 1980. Propriedades dos sedimentos. In: SUGUIO, K. *Rocha sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica*. São Paulo, Editora Edgard Blucher LTDA, p.17-124.

SURFER 8. Programa comercial desenvolvido pela Golden Software Inc. Programa utilizado para confecção de mapas de variáveis a partir de dados espacialmente distribuídos

UHLEIN, A., FONSECA, M. A., SEER, H. J., DARDENNE, M. A. 2012. Tectônica da Faixa de Dobramento Brasília – Setores Setentrional e Meridional. *Geonomos*, Minas Gerais, **20**(2):1-14.

XAVIER, F. F. 2004. Aplicação da sondagem geofísica – método eletrorresistividade – na locação de poços tubulares profundos. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá, p. 1-9.

DOAÇÃO
IGC-UKP
DATA 25/02/05