

PAULO EDUARDO FERREIRA PINTO

**CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL APLICADA À
ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL À
CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS CONFINADOS**

Trabalho de Formatura apresentado à Comissão do Trabalho de Formatura do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro, como parte das exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho de Formatura no ano letivo de 2015”

Orientador: Antonio Celso de Oliveira Braga

Rio Claro – SP
2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

PAULO EDUARDO FERREIRA PINTO

CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL APLICADA À ANÁLISE DA
VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DE
AQUÍFEROS CONFINADOS

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP
2016

551.49 Pinto, Paulo Eduardo Ferreira
P659c Condutância longitudinal aplicada à análise da
vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos
confinados / Paulo Eduardo Ferreira Pinto. - Rio Claro, 2016
69 f. : il., figs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
Ciências Exatas

Orientador: Antonio Celso de Oliveira Braga

1. Águas subterrâneas. 2. Aquífero Guarani. 3.
Eletrorresistividade. I. Título.

PAULO EDUARDO FERREIRA PINTO

CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL APLICADA À ANÁLISE DA
VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DE
AQUÍFEROS CONFINADOS

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga
Richard Francisco Fonseca
Flávio Henrique Rodrigues

Rio Claro, 01 de Fevereiro de 2016.

Assinatura do aluno

Assinatura do orientador

*À minha mãe Maria Helena, meu
pai Paulo Sergio, minha vó, Helena Orlando e
aos meus irmãos, pelo carinho e apoio.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, à minha mãe Maria Helena, meu pai Paulo Sergio e a meus irmãos por terem me dado forças e inspiração para a realização desse trabalho. Por terem guiado e abençoado meus passos nessa etapa que aqui se encerra.

A meu orientador, Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga pelos ensinamentos proporcionados, orientação, opiniões cedidas, atenção e confiança em meu trabalho, e por esta grande oportunidade.

Ao Richard Fonseca Francisco e a Vinicius Veloso pelos valiosos conselhos, apontamentos e críticas construtivas durante as conversas e pedidos de socorro ao longo do dia.

Aos funcionários da biblioteca pela atenção e auxílio nas buscas pela biblioteca.

Aos companheiros da República Safari (Cebola, Hiena, Pateta, Amnésia, Smurf, Palmito, Ney, Wilson, Liso, Golimar, Japika, Bobinho, Parangolé, Santo André, Minhoca, Escama, Groselha, Lineu, Ximit, Misto, D. Edna, Norton, Lenda e todos os que por ali passaram) pelas festa, churrascos e momentos inesquecíveis.

Ao pessoal das Repúblicas 51, Varzea e Tississinguabe pelas festas e churrasco que entrei de graça. Aos amigos do CotiLouco (Wilian Moraes, Geilson Alves, Amanda Rodrigues e Bruna Guimarães) por me acompanharem nos últimos dois anos.

*“Sorveu aquela fumaça
como se fosse o último gole de um cálice de paz.
Prendeu em seus pulmões, e deixou sair lentamente...
Aquilo que não saia da mente.”*

Andréia Maressa

RESUMO

O crescimento econômico e social aliado à falta de conservação e uso irracional dos recursos hídricos superficiais faz crescer a demanda sobre os mananciais subterrâneos. Com isso tornou-se fundamental o desenvolvimento de instrumentos que auxiliem no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho foi estimar a vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero Guarani, na área localizada entre os municípios de Marília e Bauru, através da análise de dados geológicos e geofísicos. Para tanto, foram estudadas características como espessura e resistividade elétrica da Formação Serra Geral, que recobre o Sistema Aquífero Guarani (SAG) e atua como camada protetora. A partir do parâmetro Condutância Longitudinal (S), que expressa a razão entre a espessura e a resistência elétrica da camada, elaborou-se um mapa de vulnerabilidade natural da área. Com base no processamento e reinterpretação das curvas de campo, constatou-se que em algumas regiões a camada de basalto era constituída por dois tipos de derrames com características distintas. A análise da espessura revelou a inexistência da camada confinante em uma região a leste, próximo ao município de Bauru, denominado Alto Estrutural de Piratininga. Nessa região, afloram os sedimentos que compõe o aquífero. O mapa de Condutância Longitudinal apresentou variação de 0,07 a 14 siemens, predominando áreas com baixa vulnerabilidade. Entretanto, a existência de uma camada confinante não assegura a proteção de um aquífero, pois é necessário conhecer suas características e seu grau de conservação, bem como das camadas sobrepostas.

Palavras-chave: água subterrânea, aquífero Guarani, vulnerabilidade natural, eletrorresistividade, condutância longitudinal.

ABSTRACT

The economic and social growth with the lack of preservation and the irrational use of surface water resources increases the demand on groundwater sources. With that, the development of tools that assist the planning and management of water resources became fundamental. Facing this scenario, the goal of this work was estimate the natural vulnerability to contamination of the “Aquífero Guarani” (aquifer Guarani), located between the Bauru and Marília cities, by analysis of geological and geophysical data. To do this, characteristics were study such as thickness and electrical resistivity of the “Formação Serra Geral” (Serra Geral Formation), which overlies the “Sistema Aquífero Guarani” (SAG – Guarani Aquifer System) and acts as a protective layer. Using a “Condutância Longitudinal” (S - Conductance Longitudinal) as parameter, a natural vulnerability map of the area was created, “Condutância Longitudinal” consists in the ratio between the thickness and the electrical resistance layer. Based on the processing and reinterpretation of the field curves, was determined that in some regions the basalt layer was composed of two types of spill with different characteristics. The results of the analysis of the thickness revealed the inexistence of the protective layer in an east area, near the city of Bauru, called “Alto Estrutural de Piratininga” (Structural High Piratininga). In this area, crop out aquifer composed sediments. The “Condutância Longitudinal” map presents a range from 0,07 to 14 siemens, predominantly on areas with low vulnerability. However, the existence of a protective layer does not ensure the protection of an aquifer, because it’s necessary to know its characteristics and its degree of conservation, as well as the overlapping layers.

Keywords: groundwater, Guarani aquifer, natural vulnerability, eletrorresistivity, longitudinal conductance

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	14
3.1. Aspectos Gerais.....	14
3.2. Contexto Geológico.....	16
4. Fundamentação teórica.....	26
4.1. Aquífero Guarani.....	26
4.1.1. Generalidades.....	26
4.1.2. Localização.....	26
4.1.3. Características Hidrogeológicas.....	27
4.2. Hidrogeologia.....	29
4.2.1. Considerações Gerais.....	29
4.2.2. Base Conceitual.....	30
4.3. Vulnerabilidade Natural.....	34
4.3.1. Conceitos Gerais.....	34
4.3.2. Métodos para avaliação da vulnerabilidade.....	37
4.4. Geofísica.....	40
4.4.1. Considerações Gerais.....	40
4.4.2. Método da Eletroresistividade.....	41
4.4.3. Sondagem Elétrica Vertical.....	42
4.4.4. Parâmetros de Dar Zarrouk.....	44
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
5.1. Materiais.....	47
5.2. Métodos.....	48
5.2.1. Delimitação da área de estudo.....	48
5.2.2. Caracterização da área de estudo.....	49
5.2.3. Elaboração da fundamentação teórica.....	50
5.2.4. Coleta e organização dos dados.....	50
5.2.5. Geoprocessamento.....	51
6. RESULTADOS.....	52
6.1. Espessura e resistividade da Formação Serra Geral.....	52
6.2. Resistividade elétrica e estimativa da Condutância Longitudinal (S) da Formação Serra Geral.....	54
7. CONCLUSÃO.....	60
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.....	15
Figura 2: Unidades de gerenciamento de recursos hídricos.....	16
Figura 3: Mapa das formações geológicas presentes na área de estudo.....	18
Figura 4: Localização SAG.....	27
Figura 5: Perfil esquemático.....	29
Figura 6: Distribuição de água no Planeta.....	30
Figura 7: Ciclo hidrológico.....	31
Figura 8: Classificação dos aquíferos quanto à posição.....	33
Figura 9: Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade.....	34
Figura 10: Técnica de Sondagem Elétrica Vertical – Arranjo Schlumberger.....	43
Figura 11: Exemplo de curva de campo.....	44
Figura 12: Parâmetros de Dar Zarrouk.....	44
Figura 13: Localização das SEV's utilizadas na área de estudo	49
Figura 14: Mapa de espessura da Formação Serra Geral.....	52
Figura 15: Perfil AA'.....	53
Figura 16: Perfil BB'.....	54
Figura 17: Basalto com a presença de dois derrames distintos.....	55
Figura 18: Basalto com a presença de apenas um derrame.....	55
Figura 19: Mapa de resistividade da Formação Serra Geral.....	57
Figura 20: Mapa de vulnerabilidade da Formação Serra Geral.....	59

1. INTRODUÇÃO

Dentre os recursos naturais do Planeta Terra, a água apresenta um papel de destaque. Além de ser fundamental para a manutenção dos ecossistemas, é essencial para todo tipo de vida. Entretanto, a forma como a humanidade conduz a sua exploração acarreta na contaminação e escassez da mesma.

A expansão das atividades econômicas, juntamente com o aumento populacional ocorrido no Brasil nas últimas décadas resultou no aumento da demanda por água potável, comprometendo a quantidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Segundo ANA (2010), 39% dos municípios brasileiros são abastecidos somente por reservatórios subterrâneos. No Estado de São Paulo, essa fração aumenta para, aproximadamente, metade dos municípios paulistas, sendo a maioria localizada na parte ocidental do Estado.

Na região de interesse desta pesquisa, localizada entre os municípios de Marília e Bauru, observa-se elevada dependência dos recursos subterrâneos. De um total de 24 municípios, 14 utilizam somente água subterrânea em seu abastecimento, 7 são abastecidos por sistema misto e 3 utilizam somente reservatórios superficiais no seu abastecimento (CETESB, 2012). Nela ocorrem dois sistemas aquíferos: Sistema Aquífero Bauru (SAB) e Sistema Aquífero Guarani (SAG). O primeiro encontra-se aflorante em praticamente toda a área (DAEE et al, 2003). Já o segundo, encontra-se predominantemente confinado, apresentando na região uma pequena área de afloramento denominado de Alto Estrutural de Piratininga.

O Sistema Aquífero Guarani é um manancial de dimensões continentais abrangendo parte do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. Compreendendo um pacote sedimentar, na região Sudeste, é representado pelas Formações Pirambóia e Botucatu. Sobreposta a esses sedimentos encontra-se uma camada de basalto denominada Formação Serra Geral. Devido a esta cobertura, praticamente impermeável o aquífero pode ser considerado confinado em quase toda sua extensão, sendo livre somente em suas regiões limítrofes onde as camadas sedimentares que o compõem afloram (BORGHETTI et al. 2004).

De acordo com a Cetesb (2012), o aquífero Guarani possui águas fracamente salinas com variação dos parâmetros cloreto, sódio, pH e temperatura. Conforme o Diagrama de Piper, suas águas podem ser classificadas como bicarbonatadas cálcicas e, secundariamente, como bicarbonatadas sódicas.

Geralmente, a busca por recursos de qualidade e em quantidades significativas resulta na exploração de poços, sem que antes sejam feitos estudos para uma utilização sustentável. Dentre os impactos causados pela falta de informação estão o rebaixamento do nível freático (N.A.) e a contaminação por cunhas salinas em regiões costeiras. Conseqüentemente, os impactos nas águas subterrâneas refletem nos recursos superficiais acarretando em seca de nascentes, redução do volume de água que alimenta os rios e contaminação de reservatórios (HIRATA, 1994; OEA, 2009).

Dessa forma, a necessidade de estudo para melhor conhecer os mananciais subterrâneos é indiscutível, uma vez que a remediação dessas áreas demandam muito tempo e recursos financeiros. Sendo assim, a utilização de métodos de investigação que apresentem custo reduzido e resultados rapidamente é inevitável (HIRATA; FERREIRA, 2001). Nesse cenário, os métodos geofísicos, mais precisamente os métodos geoeletricos, aliados ao mapeamento da vulnerabilidade apresenta-se como uma medida preventiva induzindo à aplicação de esforços técnicos e financeiros em áreas mais vulneráveis e auxiliando o Poder Público na gestão dos recursos hídricos.

Com isso o trabalho propõe, a partir de dados geofísicos obtidos pela técnica da sondagem elétrica vertical, avaliar a vulnerabilidade natural do aquífero Guarani, considerando as rochas basálticas da Formação Serra Geral. Para tal, foram reunidos e analisados dados geológicos, geofísicos e hidrogeológicos da região de estudo que quando integrados resultarão na estimativa da Condutância Longitudinal da camada confinante.

2. OBJETIVOS

Com o presente trabalho objetivou-se estimar a vulnerabilidade natural do aquífero Guarani. Por meio da sistematização, análise e integração de dados geológicos e geofísicos, buscou-se testar a aplicabilidade do parâmetro de Dar Zarrouk na avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos confinados.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Aspectos Gerais

A área de estudo (Figura 1) localiza-se na região centro-sul do Estado de São Paulo, cuja superfície é de aproximadamente 4.911 km², abrangendo 24 municípios. Seu acesso se dá por meio das rodovias estaduais SP – 294 (Comandante João Ribeiro de Barros), SP – 280 (Presidente Castelo Branco) e pela rodovia federal BR – 153 (Transbrasiliana).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é predominantemente do tipo Cwa, isto é, subtropical úmido, com verão quente e úmido e inverno seco, onde a média de temperatura dos meses mais quentes é superior a 22°C (ROLIM, 2007).

Com relação à pedologia, na área de estudo prevalecem o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Argissolo Vermelho. Os latossolos são muito intemperizados, profundos, bem drenados e compostos, principalmente, por argilas e quartzo. Já os argissolos geralmente são rasos e caracterizados pela presença de um horizonte B textural com iluviação de argila (EMBRAPA, 2006; IBGE, 2007).

Quanto à geomorfologia, a área encontra-se na Unidade Morfoestrutural da Bacia do Paraná, no compartimento da Unidade Morfoescultural Planalto Ocidental Paulista. A qual apresenta um relevo levemente ondulado, com a presença de colinas amplas, baixas e com topos aplainados (ALMEIDA, 1964; ROSS, 1997).

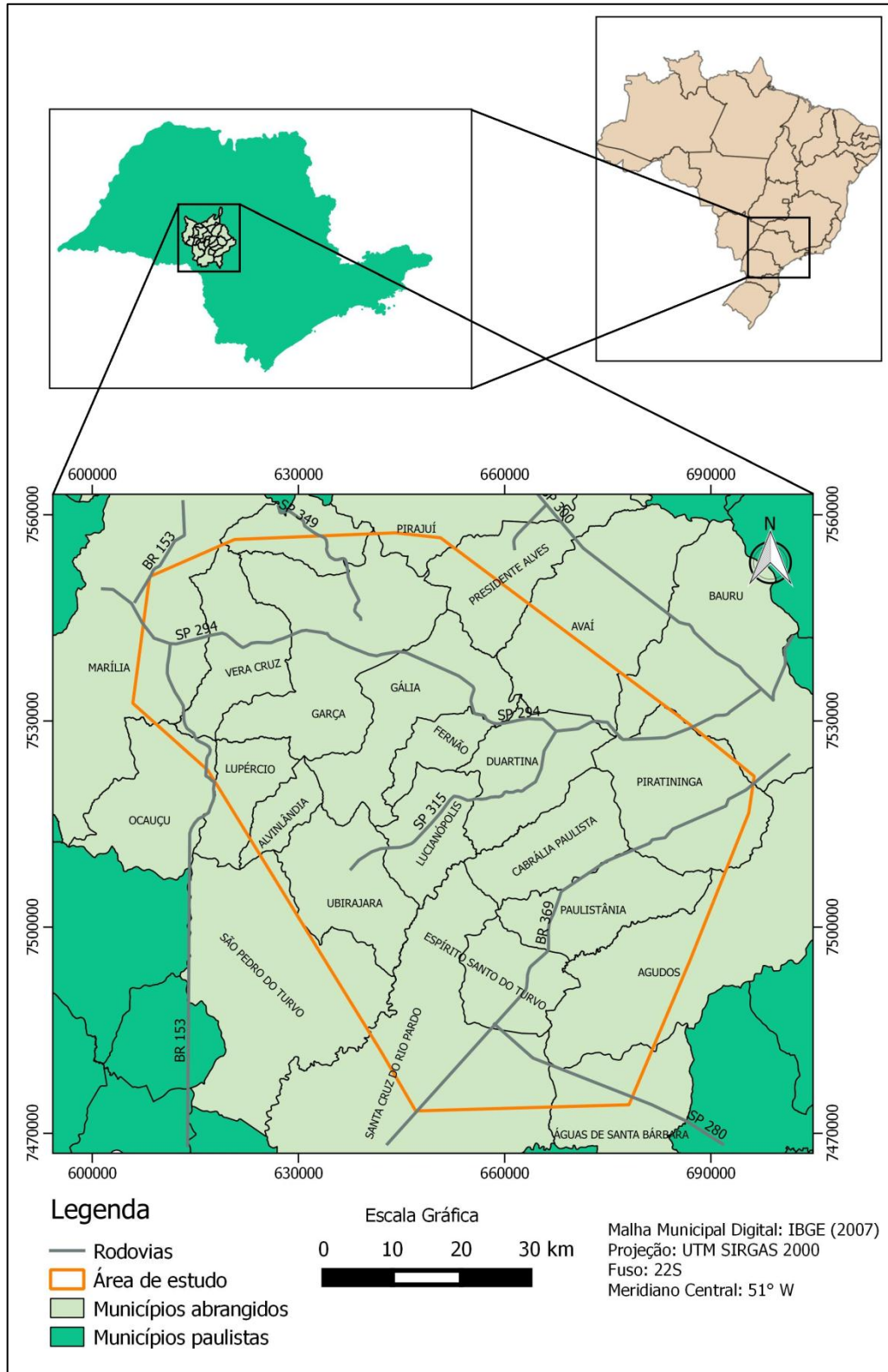
As atividades econômicas desenvolvidas na região são bem diversificadas. Nas áreas urbanas, as indústrias dos ramos alimentícios e sucroalcooleiro são as principais atividades. Nas zonas rurais, as plantações de café e cana-de-açúcar são as atividades predominantes (CBH/MP, 2013; CBH/TB, 2012).

A região estudada abrange quatro Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), conforme pode se ser observado na Figura 2, sendo elas: Peixe (21), Médio Paranapanema (17), Tietê-Batalha (16) e Aguapeí (20). Os principais corpos d'água que cruzam a região são os rios Peixe, Turvo, Batalha e São João e o ribeirão Alambari.

Em se tratando de recursos hídricos subterrâneos, a região apresenta grande disponibilidade devido à presença de três aquíferos potenciais na área, a saber: Sistema Aquífero Bauru (SAB), Aquífero Serra Geral e Sistema Aquífero Guarani (SAG). Por se tratar de um aquífero fraturado, nem sempre o aquífero Serra Geral se apresenta como alternativa para o abastecimento, pois sua disponibilidade dependerá da presença de fraturas no local. Já

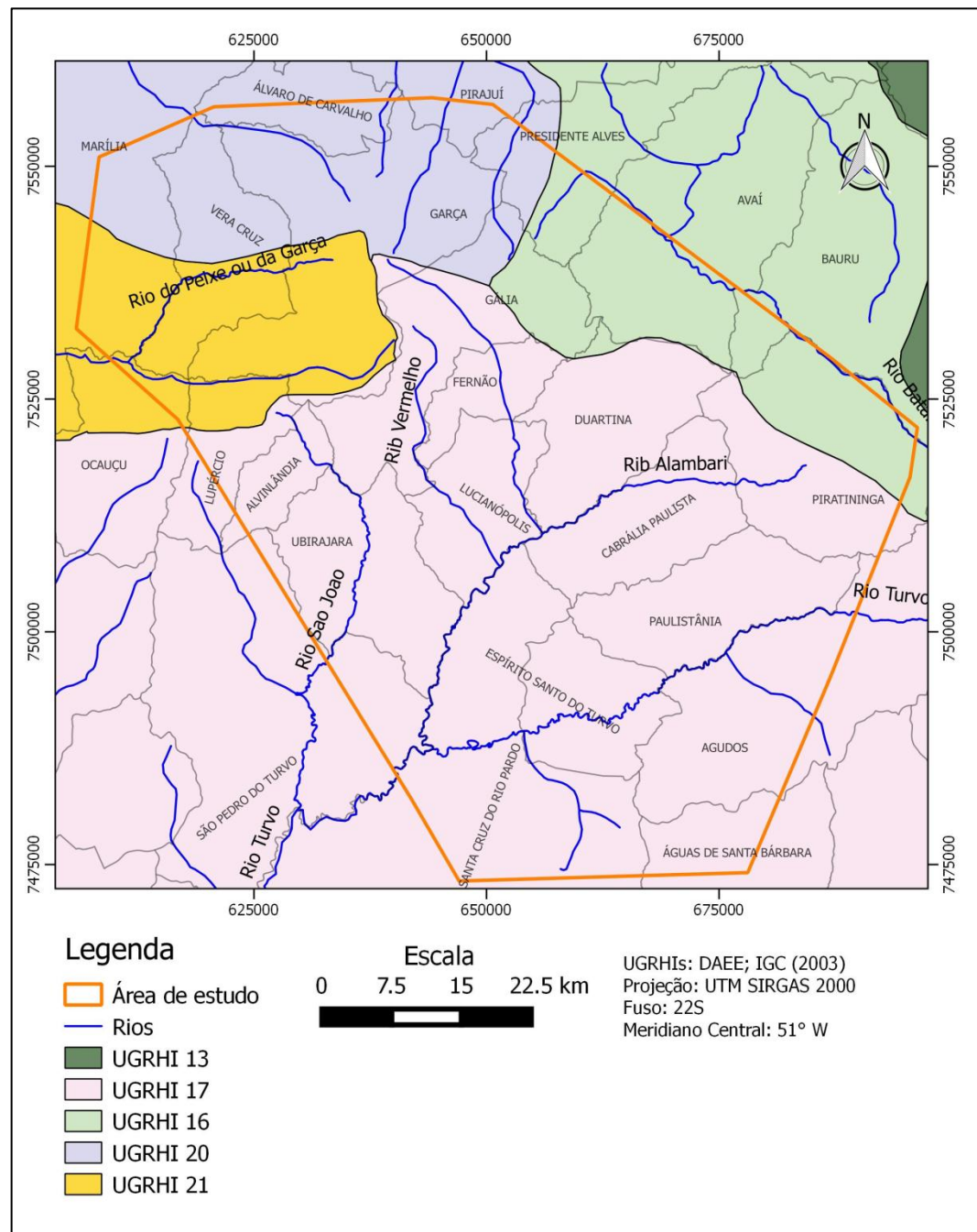
os outros dois sistemas são as principais fontes subterrâneas da região. Ambos são aquíferos de origem sedimentar, entretanto na área de estudo, o SAB encontra-se livre e o SAG encontra-se confinado.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Adaptado de IBGE (2007)

Figura 2: Unidades de gerenciamento de recursos hídricos



Fonte: Adaptado de DAEE; IGC (2003)

3.2. Contexto Geológico

Conforme pode se observar no Mapa das Formações Geológicas (Figura 3) predominam na área rochas do Grupo Bauru. Entretanto em uma pequena área a leste afloram

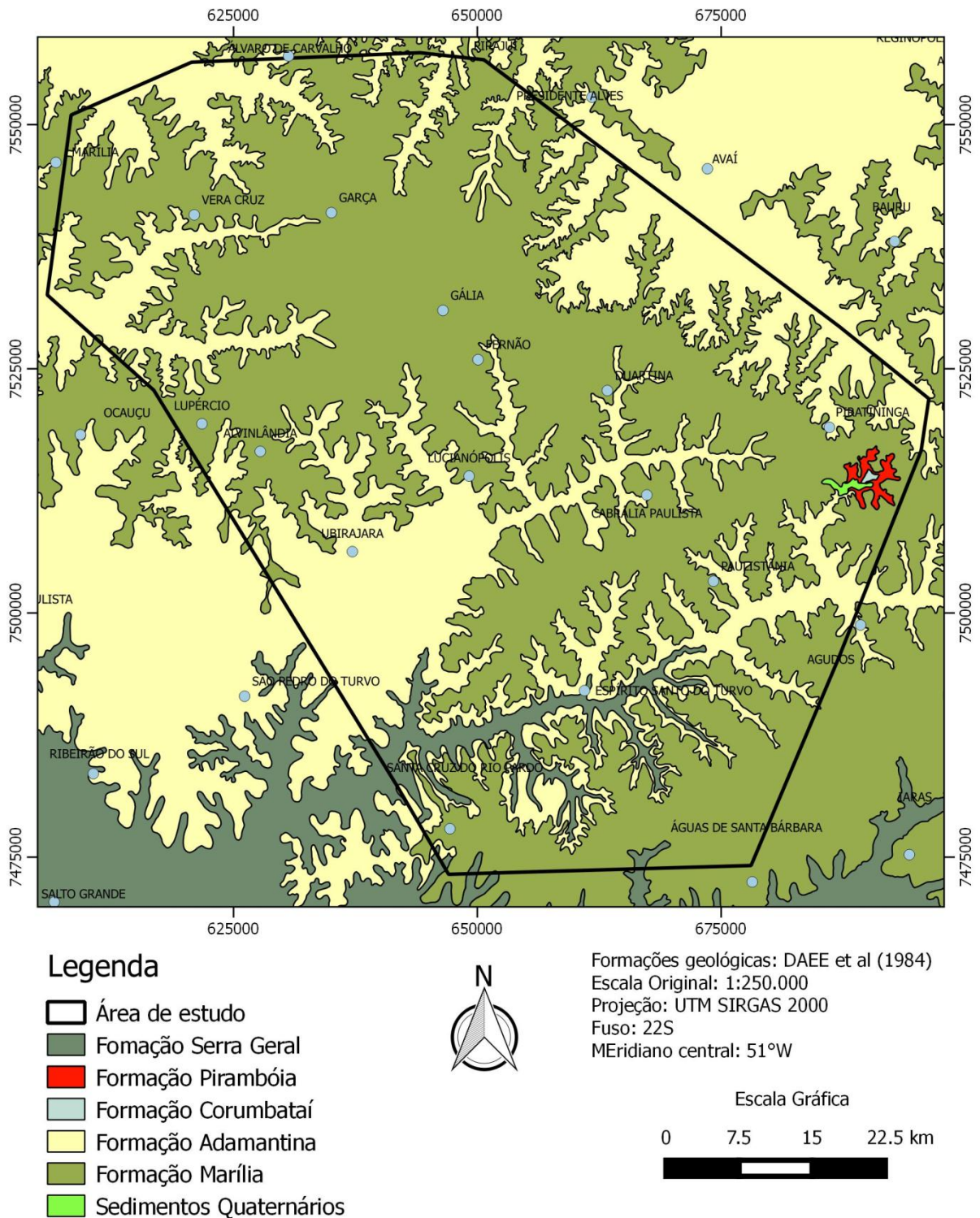
rochas pertencentes às Formações Pirambóia (Grupo São Bento) e Corumbataí (Grupo Passa Dois). O contato entre essas formações e as que compõem o Grupo Bauru evidencia a inexistência da camada de basalto na região, ou seja, nessa área o aquífero Guarani encontra-se sem sua camada de proteção, Formação Serra Geral.

A Bacia do Paraná é uma região sedimentar do continente sul-americano, abrangendo territórios do Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina e com uma área de, aproximadamente, 1,5 milhões de km². Ela apresenta-se de forma ovalada, sendo o seu eixo maior N-S e seu contorno atual é definido por limites erosivos correlacionados a história geotectônica do continente. O registro estratigráfico da mesma abarca um pacote sedimentar-magmático, com uma espessura que pode chegar aos 7.000m, cujo depocentro coincide com a calha do Rio Paraná (ALMEIDA, 1964; PETRI; FULFARO, 1983).

Milani *et al* (2007) dividem o desenvolvimento da Bacia do Paraná em seis supersequências: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru. Durante o Gondwana I, esta bacia presenciou uma grande de sedimentação marinha evidenciada por suas camadas mais antigas. Essas condições se devem às águas oceânicas do Panthalassa que tiveram acesso a área da em diversos períodos. Gradativamente, este acesso foi sendo impossibilitado, e a partir do Neopermiano, iniciou-se a continentalização dos sistemas deposicionais resultando no seu fechamento e consequente isolamento no interior do Pangea (MILANI, 1997).

No final da supersequência Gondwana III, os campos de dunas eólicas característicos da Formação Botucatu estavam formados e foi durante o início do Período Cretáceo que ocorreram rupturas que fragmentaram o paleocontinente Gondwana e resultaram em espessos derrames de lava basáltica. O resfriamento das lavas formaram basaltos, que posteriormente foram denominados Formação Serra Geral. Em seguida, no fim do Período Cretáceo, e com a permanência do ambiente predominantemente desértico depositaram-se os sedimentos da supersequência Bauru, que na área de estudo está representada pelas Formações Adamantina e Marília.

Figura 3: Mapa das formações geológicas presentes na área de estudo



Fonte: Modificado de DAEE et al (1984)

Grupo Passa Dois

Segundo Schneider *et al* (1974), no Estado de São Paulo, o Grupo Passa Dois é representado pelas formações Irati e Corumbataí. Esta última caracteriza-se, segundo

Mezzalira *et al* (1981), por ser dividida em duas porções. A superior é composta por argilitos, folhelhos e siltitos roxos a avermelhados, apresentando intercalações de bancos carbonáticos e camadas de arenitos muito finos. Já a parte inferior por argilitos, folhelhos e siltitos de coloração cinza escura, apresentando fraturais conchoidais, concreções calcíferas e, eventualmente, leitos de calcário.

A formação apresenta, em sua maioria, estratificação plano-paralela, entretanto ainda pode se observar laminação *flaser*, fendas de ressecamento, laminação cruzada, marcas ondulares e, associadas aos calcários oolíticos, estruturas estromatolíticas. Seu contato inferior com a Formação Irati ocorre de forma concordante, já seu contato com a Formação Pirambóia, sobrejacente, é discordante (SCHNEIDER *et al* 1974). Zanardo (2003) sugere um ambiente deposicional marinho raso com clima predominantemente árido. Já Perinotto *et al* (2008) acreditam que a sedimentação ocorreu em ambiente continental lacustre em planície de maré e que a presença de domos estromatólitos referem-se a regressões marinhas em ambientes estressantes.

Grupo São Bento

O Grupo São Bento, no topo, é constituído por rochas extrusivas básicas da Formação Serra Geral. Recoberta por esta formação, encontra-se uma sequência clástica majoritariamente arenosa que representam as Formações Pirambóia e Botucatu.

A Formação Pirambóia, segundo Rebouças (1976), tem o início de sua deposição no Período Triássico médio. Soares (1975) descreve-a como sendo composta, em maior parte, por arenitos finos a médios e ocasionalmente grossos a muito grossos, com uma matriz silto-argilosa de até 20%. Os arenitos ainda apresentam esfericidade variando entre regular e boa, má seleção, acamamento plano-paralelo e estratificação cruzada planar de pequeno a médio porte, tangencial na base, e ocasionalmente estratificação cruzada acanalada. O autor supracitado acredita que os sedimentos seriam de origem fluvial de rios meandantes e apresentam duas fácies. Uma delas, inferior, seria de corpos com estratificação cruzada representando as fácies de canal. Já o membro superior seria composto por arenitos muito argilosos, lamitos e argilitos, em repetição cíclica, apresenta estratificação plano-paralela, representando as fácies de transbordamento.

Analisando a Formação Pirambóia, Caetano-Chang (1997), descreveu quatro associações de fácies: dunas, interdunas, lençóis de areia e canais fluviais. Os depósitos de dunas são constituídos por arenitos finos a muito finos, ocasionalmente siltosos, com intercalações de arenito médio a grosso e apresentando boa seleção. A associação de interdunas compreende interdunas eólicas, interdunas úmidas e interdunas aquosas. Estas,

devido a presença de água, apresentam lâminas argilo-siltosas. Texturalmente, as interdunas caracterizam-se por arenitos finos a muito finos siltosos, com matriz de argilas infiltradas, clastos de lama e delgadas lâminas de argilito.

Os depósitos de lençóis de areia apresentam-se como depósitos delgados de arenitos finos a muito finos, com ou sem silte, intercalados com finas lentes de arenito grosso a médio. Já os depósitos fluviais são compostos por arenitos médios a grossos e arenitos conglomeráticos e apresentam estratificação cruzada acanalada de pequeno a médio porte (CAETANO-CHANG, 1997). Para Giannini *et al* (2004), essas fácies de canais fluviais representariam o desenvolvimento de rios entrelaçados em um período de intensa atividade tectônica na bacia. A desertização do clima fica evidente na alteração das fácies que, da base para o topo, vão se tornando típicas de um sistema eólico deixando de lado suas características de sistema fluvial (MONTEIRO, 2003).

Devido a origem em desertos de clima árido a semiárido as Formações Pirambóia e Botucatu não deveriam apresentar material detrítico entre os grãos, uma vez que partículas muito finas são carregadas pelos ventos para além do ambiente desértico (CAETANO-CHANG; WU, 2003). Entretanto a Formação Pirambóia apresenta argila intersticial de origem diagenética. Este material argiloso penetra nos arenitos através das águas superficiais repletas de finos, as quais eram provenientes de enchentes temporárias em ambiente desértico. Ao penetrar nos poros a água perde a carga de finos em suspensão que fica presa junto aos grãos. A presença da argila nos interstícios dos grãos causa modificações em sua textura levando a diminuição de sua permo-porosidade afetando o potencial hidrogeológico da camada.

O contato superior ocorre com a Formação Botucatu por meio de bruscas alterações na textura, na estrutura e na cor dos sedimentos, o que para Milani *et al* (2007) significa um hiato deposicional entre as duas formações de cerca de 90M.a.

Assim como a Formação Pirambóia, os sedimentos da Formação Botucatu têm suas origens em áreas de relevo pouco acentuado, oriundos de rochas cristalinas e sedimentares, acumulados em bacia estável, com transporte prolongado e retrabalhados por abrasão seletiva em clima semiárido e árido de ambiente desértico, eventual e temporariamente cortado por rios (WU; CAETANO-CHANG, 1992; ASSINE *et al*, 2004).

A Formação Botucatu é composta por arenitos finos a muito finos, muito friáveis, teor de lama (silte + argila) inferior a 10% e apresenta estratificação cruzada de médio a grande porte, depositados em ambiente desértico, com intercalação de lâminas de arenitos finos a

médios. Além do mais, os sedimentos apresentam boa seleção, bom arredondamento e ausência de matriz argilosa (ASSINE et al, 2004).

Para Wu e Caetano-Chang (1992), a Formação Botucatu é composta por arenitos avermelhados. Sua granulometria é bimodal, apresentando grãos que variam de areia média a grossa e de fina a muito fina, com predominância de uma granulação fina a média, com grãos subangulares a arredondados na fração fina e arredondados na fração grossa. Eles ainda são foscos, com elevada esfericidade, silicificados ou friáveis e não apresentam matriz. Em sua porção inferior apresenta arenitos conglomeráticos a conglomerados, já na porção superior ocorrem arenitos intercalados a rochas magmáticas evidenciando a contemporaneidade entre o fim do período de acumulação da Formação Botucatu e os primeiros derrames da Formação Serra Geral. Sua idade é atribuída ao fim do Jurássico e início de Cretáceo (SOARES, 1975).

Após um longo período de estabilidade durante o Permiano, a porção sudoeste do supercontinente Gondwana apresentou os primeiros sinais dos intensos processos tectônicos que, no início do Cretáceo, resultaram no maior extravasamento de lava basáltica já estudado. Representado no Brasil pela Formação Serra Geral, este fenômeno antecedeu e seguiu o rompimento do paleocontinente e continuou com o princípio do afastamento do assoalho oceânico e deriva continental, que ocasionariam o desmembramento entre a América do Sul e a África e a formação do Oceano Atlântico (RICCOMINI, 1995; ROCHA, 1997).

A Formação Serra Geral caracteriza-se por inúmeros derrames predominantemente basálticos, de idade juro-cretácea (ALMEIDA, 1986). A topografia do topo da unidade é bastante irregular, com altos e baixos estruturais, com caimento para noroeste e sudoeste onde atingem as cotas mais baixas. No Estado de São Paulo, o topo desta formação apresenta mergulho na direção noroeste. Segundo Santoro e Massoli (1985), em linhas gerais a superfície basáltica comporta-se como uma siclinal com mergulho na direção NW, correspondendo aproximadamente ao vale do rio Tietê. A sua espessura é bem variada podendo atingir, em subsuperfície, mais de 1.500m (MEZZALIRA et al, 1981).

A Formação Serra Geral representa o magmatismo básico do Grupo São Bento, na Bacia do Paraná. Relacionados aos derrames ocorre a presença de intrusões na forma de *sills* e diques cortando as estruturas sedimentares pré-existentes, ou mesmo preenchendo fraturas associadas à própria atividade magmática fissural (GOMES, 2001).

Para Monteiro (2003), os derrames que deram origem a esta formação possuem distinções regionais relacionadas a sua composição química, evidenciando a diversidade de mecanismos e fontes do magma. Aproximadamente 90% dos derrames sobre a Bacia do Paraná são compostos por basaltos toleíticos e andesitos basálticos. Entretanto, em áreas

como a sudeste da bacia, encontram-se expressivas quantidades de rochas ácidas na parte superior dos derrames.

Segundo SQUISATO *et al* (2009), os basaltos da Formação Serra Geral são compostos por plagioclásio (30% a 50%), piroxênio (20% a 35%) e por minerais opacos (5% a 15%). Essas rochas apresentam variações de tons de cinza a negro, granulação variando de densa a média e a textura mais comum é a intergranular, na qual cristais euédricos e ripiformes de plagioclásio compõem uma malha onde os interstícios estão ocupados por cristais de clinopiroxênio e magnetita.

O resfriamento das lavas ocorre de fora para o interior do derrame. A natureza simétrica do resfriamento faz com que os derrames apresentem um zoneamento estrutural peculiar, podendo ser dividido em basalto vesículo-amigdaloidal no topo e na base, e basalto compacto na porção central do derrame (GOMES, 2001). Outro tipo de fratura também frequente são aquelas que ocorrem devido ao alívio de carga causado pela erosão, nas quais as juntas produzidas são abertas facilitando a percolação de líquidos (LASTORIA, 2002).

O basalto compacto é resultado do resfriamento lento da lava, apresentando coloração que varia entre o cinza e o preto e é composto, principalmente, por feldspato, plagioclásio, augita, magnetita e matéria vítrea. Com relação ao grau de cristalinidade, eles podem variar entre holo e hipocristalinos. Já o basalto vesículo-amigdaloidal tem sua origem relacionada ao rápido resfriamento da periferia do derrame sem o escape total dos gases voláteis presentes. Sua composição é similar ao basalto compacto, porém apresenta maior quantidade de matéria vítrea. As amígdalas (cavidades) apresentadas possuem dimensões variadas podendo ou não estar preenchidas por minerais secundários (GOMES, 2001).

Analisando as informações de DAEE (1976) e o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE *et al*, 1984), observou-se uma área com características geológicas peculiares nas proximidades do município de Bauru, denominada Alto Estrutural de Piratininga.

Na Bacia do Paraná, durante o mesozoico, a Reativação Wealdeniana reativou falhas, com alto grau de mergulho, nas direções SE – NW e SW – NE que “trincou” o pré-Bauru formando *grabens* e *horsts*. Essa tectônica pré-Bauru soergueu a Formação Corumbataí à cotas superiores a 380m na região sudoeste, baixando até a cota 20m a nordeste. Dessa maneira, as formações do Grupo São Bento também sofrem esses reflexos (PAULA e SILVA; CAVAGUTI, 1992).

Subsequentemente, a região sofreu um intenso processo de erosão aplainando sua superfície e, conseqüentemente, alterando a espessura das camadas chegando ao ponto de

erodir completamente as Formações Botucatu e Serra Geral, de modo que ocorre o contato direto entre as rochas do Grupo Bauru e a formação Pirambóia.

Para Campos *et al* (2008), a área de ocorrência da Fm Corumbataí é restrita a região central do Domo de Piratininga. Ela encontra-se influenciada pela tectônica relacionada ao domo, apresentando camadas inclinadas em diferentes direções e com mergulho variando entre 20° e 80°. Derivada do mesmo contexto de formação, a Formação Pirambóia aflora na região mais externa da área sendo as atitudes do acamamento concordante com as da Formação Corumbataí.

Grupo Bauru

As rochas cratóceas suprabasálticas da Bacia do Paraná, referentes ao Grupo Bauru, são compostas por sedimentos silicásticos continentais, depositados na região centros-sul da Plataforma Sul-Americana. No Estado de São Paulo ocupam uma área de 117.000km², sua espessura média é da ordem de 100m, podendo superar os 300m em regiões como Marília (PAULA e SILVA, 2003). Paula e Silva e Cavaguti (1994) destacam que, em quase toda sua área de ocorrência, o Grupo Bauru sobrepõe-se aos basaltos da Formação Serra Geral, entretanto há algumas localidades como em Bauru e Agudos em que as formações do Grupo Bauru assentam-se diretamente sobre as Formações Pirambóia e Botucatu. De acordo com Soares *et al* (1980), o Grupo Bauru divide-se em cinco formações, sendo elas: Marília, Adamantina, Santo Anastácio, Uberaba (restrita ao Triângulo Mineiro) e Caiuá. Entretanto, a partir de Fernandes (1998) esta última foi elevada a categoria de grupo sendo dividida em três outras formações.

Segundo Paula e Silva *et al* (2005), a sedimentação do Grupo Bauru ocorreu em três fases principais de deposição. Com o fim do vulcanismo no Cretáceo inferior, a Bacia do Paraná sofreu um rápido ciclo erosivo. Devido às condições climáticas, um deserto com deposição de areias eólicas poderia ser formado, porém o resfriamento da região fez com que o ambiente passasse de desértico para fluvial com direção preferencial de escoamento para oeste-sudoeste e com elevada carga arenosa derivada de areias eólicas. No Cretáceo médio a região transformou-se novamente passando a um sistema fluvial meandante e contraiu-se para faixas marginais. No fim do Cretáceo médio, leques aluviais se formaram a partir das faixas marginais e o clima tornou-se árido novamente. O soerguimento de arcos estruturais favoreceu a transformação do sistema meandante periférico para os leques aluviais dando início a um novo ciclo erosivo culminando no aplainamento da região.

A Formação Adamantina é composta por arenitos finos a muito finos, apresenta lentes de siltito, de cor rosa a castanho, e argilitos castanho-avermelhados e frequentemente é

atestada a presença de nódulos e cimentação carbonática. Apresenta-se em bancos, com estratificações cruzadas acanaladas e tabulares tangenciais na base, intercalados com bancos maciços ou com acamamento plano paralelo (FERNANDES, 1992). Com os basaltos da Formação Serra Geral seu contato ocorre de forma discordante com a presença de conglomerados na porção basal do contato.

Paula e Silva (2003), por meio de estudos geofísicos, atesta a diminuição do conteúdo argiloso e da frequência das intercalações pelíticas em direção ao topo da unidade. Além disso, ele alega que, devido aos padrões de sedimentação observado, a deposição de sedimentos ocorreu em sistemas fluviais prográdantes.

Soares *et al* (1980) afirmam que o contexto deposicional da Formação Adamantina caracteriza-se por um extenso sistema fluvial meandrante pelítico ao sul transformando-se em psamítico a leste e norte. Suguio *et al* (1977) acreditam que a parte inferior da unidade representa a deposição por meio de lagos rasos originados nas irregularidades do topo do basalto pré-existente. Já a porção superior teria sido acumulada em meio a um sistema de drenagem mais ordenado com canais fluviais meandranes e planícies de inundação.

A Formação Marília, unidade de topo do Grupo Bauru, é composta predominantemente por arenitos maciços e conglomerados. Do ponto de vista litoestratigráfico é subdividida em três membros, dois dos quais (Membros Ponto Alta e Serra Galga) ocorrem exclusivamente no Triângulo Mineiro. Já o terceiro, Membro Echaporã, ocorre nas demais áreas ocupadas por esta formação.

Constituída por arenitos grosseiros a conglomeráticos, a Formação Marília é formada por grãos angulosos, teor de matriz variável, seleção pobre e ricos em feldspato, minerais pesados e minerais instáveis. Apresenta-se em bancos com espessura entre 1 e 2m, maciços ou com acamamento subparalelo e contínuo, ocasionalmente apresentam estratificação cruzada de médio porte com seixos localizados nos estratos cruzados (SOARES *et al*, 1980; FERNANDES, 1992).

De acordo com Soares *et al* (1980), esta unidade diferencia-se das demais unidades do Grupo Bauru devido à granulação grosseira de seus sedimentos e por apresentar caráter maciço dos bancos. A partir da análise de dados geofísicos, Paula e Silva (2003) constata a predominância de depósitos progressivamente mais arenosos em direção ao topo da unidade, o que indica o assoreamento da área deposicional.

Seu contato com a Formação Adamantina se dá por meio de sucessivas superfícies erosivas, ora apresentam mudança brusca na litologia e conglomerado basal, ora apresentam interdigitamento de camadas das duas formações. Com a Formação Serra Geral seu contato é

caracterizado por uma discordância erosiva, apresentando mais de 1m de conglomerado com abundância de seixos de basalto, quartzito, arenito e ágata. Na região do Alto Estrutural de Piratininga, a mesma assenta-se diretamente sobre as Formações Pirambóia e Botucatu por meio de uma discordância angular (MEZZALIRA et al, 1981).

Soares *et al* (1980) atestam que a formação desta unidade se deu por meio de correntes de alta energia, com transporte fora de canais em extensos lençóis de escoamento, com deposição rápida de modo a impossibilitar a formação de estruturas nodulares. Novas torrentes retrabalhaam esses sedimentos levando os nódulos junto com seixos trazidos da área fonte e redepositando-os. A falta de matriz nos arenitos de deposição rápida sugere que o clima era árido impossibilitando a formação de solos argilosos.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Aquífero Guarani

4.1.1. Generalidades

Atualmente, a água subterrânea é uma fonte fundamental para diferentes tipos de uso, porém sua utilização e manejo inadequados podem comprometer suas reservas e sua qualidade. Há 50 anos a existência do Sistema Aquífero Guarani era praticamente desconhecida, entretanto, a partir da década de 70, principalmente no Brasil, houve um surto exploratório e atualmente o aquífero é explorado por uma quantidade enorme de poços. Devido a sua qualidade e seu padrão de ocorrência, as águas do SAG devem ser consideradas um recurso natural nobre. Embora possa ser empregado com diversas finalidades, o abastecimento público deve ser o principal, tanto que varias cidades do interior paulista de médio e grande porte são dependentes desse sistema. Seu uso se deve as vantagens quando comparado às águas superficiais, dentre eles: maior qualidade, maior proteção frente a contaminantes, volume e resistência a variações climáticas.

Para indústrias, onde uma água de boa qualidade é fundamental para seus processos de fabricação o SAG oferece vantagens quanto a sua qualidade e ocorrência. O uso na agricultura é bastante controverso, devido aos grandes volumes requeridos. Além disso, em áreas de ocorrência mais profundas do SAG os teores de salinidade e sódio são elevados (ROCHA, 1997).

4.1.2. Localização

A América do Sul abriga na Bacia Sedimentar do Paraná, um dos maiores reservatórios de água subterrânea do mundo. O SAG localiza-se na porção centro-leste da América do Sul entre as coordenadas 12° e 35° de latitudes sul e 47° e 65° de longitude oeste. Ocupando aproximadamente 75% da Bacia Sedimentar do Paraná, possui uma área de 1.087.879 km² (Figura 4). É considerado um dos mais importantes aquíferos transnacionais ocupando as regiões norte e centro-oeste do Uruguai, oeste de Paraguai, nordeste da Argentina e sul, sudeste e centro-oeste do Brasil (BORGHETTI et al, 2004; OEA, 2009).

Em território nacional, encontra-se 70% da extensão do aquífero abrangendo os Estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso. No Estado de São Paulo o SAG ocupa uma área de aproximadamente 143.000km² dos quais 89% (128.000km²) encontram-se confinados (BARBOSA et al, 2011).

Figura 4: Localização SAG



Fonte: Iritani; Ezaki, (2009, apud BORGHETTI et al, 2004)

4.1.3. Características Hidrogeológicas

O aquífero Guarani é constituído por um pacote de camadas arenosas que se sedimentaram na Bacia do Paraná ao longo dos períodos Triássico e Jurássico (entre 200 e 132 milhões de anos) dando origem, no Brasil, as formações Pirambóia e Botucatu. Durante a era Paleozóica, a Bacia do Paraná sofreu invasões do mar, glaciação e esforços tectônicos, o que em vários momentos resultou em depósitos de materiais finos como argila e silte (ROCHA, 1997; BARBOSA et al, 2011). No Período Triássico, o mar regrediu, rios e lagos se formaram e o clima foi se tornando desértico. Com isso, um novo ciclo de deposição com sedimentos arenosos, argilosos, lacustrinos, fluviais e eólicos deu origem a Formação Pirambóia. No Período Jurássico, com o clima se tornou mais severo e o ambiente se transformou em um imenso deserto. Nesta época, a sedimentação de arenitos eólicos originou a Formação Botucatu. Segundo Camponogara (2006), esta última é a mais importante, pois

devido ao ambiente de formação, seus grãos apresentam grande homogeneidade, havendo baixa presença de material fino (matriz) entre eles, o que resultou em um reservatório com alta porosidade e permeabilidade.

Posteriormente ao Jurássico, no Período Cretáceo, a Bacia do Paraná foi influenciada por um intenso processo de vulcanismo. Derrames de lava basáltica cobriram quase toda área da bacia, alcançando, em algumas áreas uma espessura de até 1.500 m. Junto com o vulcanismo, perturbações tectônicas geraram extensos falhamentos o que resultou no soerguimento das bordas e arqueamentos que caracterizaram a estrutura atual. Logo, a arquitetura do aquífero é resultado dos derrames sobrepostos a ele, de falhamentos e arqueamentos regionais e do soerguimento das bordas da Bacia Sedimentar do Paraná que originaram as áreas de afloramento (ROCHA, 1997).

Sua ocorrência se dá por quase todo o manancial, de modo que a área confinada do aquífero pode chegar a 87%. No Estado de São Paulo, a parte aflorante do Guarani ocupa uma área de aproximadamente 16.000km², de norte a sul do Estado passando pela região de Ribeirão Preto e Botucatu, com uma espessura média de 100m. Entretanto, a região em que se encontra confinado é muito maior podendo chegar a 174.000km². Nessa área a espessura pode alcançar 400m nas proximidades da calha do rio Tietê e o topo do aquífero encontra-se a uma profundidade de 1.300m abaixo de nível do mar na região de Presidente Prudente (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005; IRITANI; EZAKI, 2009).

Segundo Rocha (1997), o confinamento do aquífero (Figura 5) atribui-lhe condições de artesianismo em boa parte de sua área. A linha piezométrica virtual encontra-se a uma altitude de 450m delimitando o artesianismo a locais onde a cota topográfica é inferior a esta. A recarga do SAG ocorre por dois mecanismos. Um deles é a recarga direta pelas chuvas nas áreas de afloramento. A segunda, que ocorre de modo muito mais lento, se dá pela drenança (infiltração vertical) por meio de descontinuidades da camada confinante.

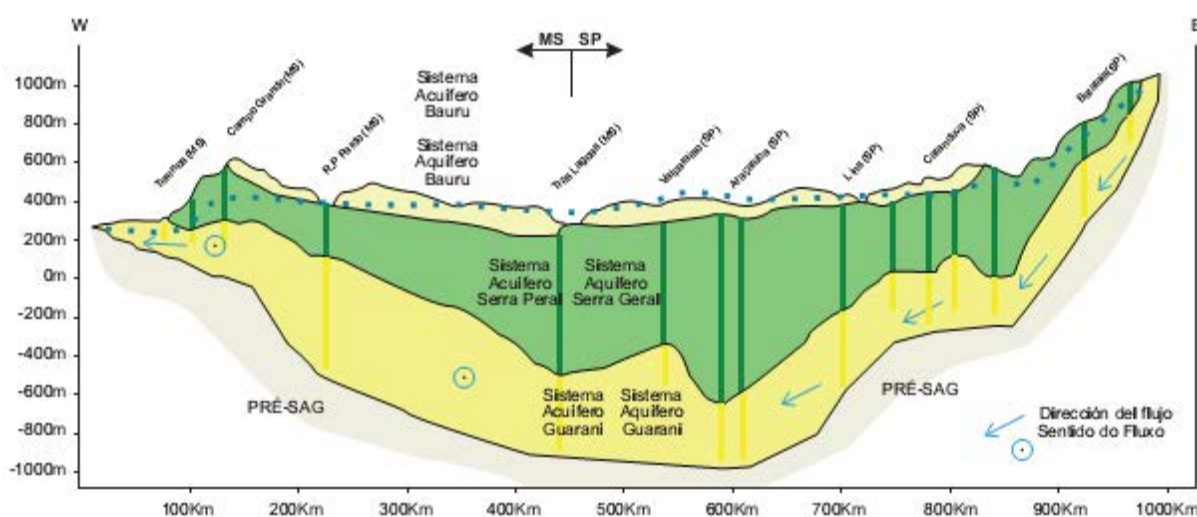
O SAG pode ser dividido em três áreas. A primeira, onde o aquífero é considerado livre, o risco de contaminação é maior e a exploração ocorre de forma mais intensa e barata. Outra região a ser considerada é a região onde o manancial encontra-se confinado e o seu grau de proteção é elevado, devido às camadas subjacentes. Por fim, a última zona, é a região de descarga do aquífero no Rio Paraná.

A partir de ensaios realizados em poços no Estado de São Paulo, foram obtidas algumas características hidráulicas fundamentais para a compreensão do comportamento do aquífero. O coeficiente de permeabilidade e o coeficiente de armazenamento são da ordem de

3m/dia e de 10^{-4} a 10^{-6} , respectivamente. Já a porosidade foi estimada entre 15 e 20% e a velocidade de circulação entre 0,5 e 0,75cm/dia, sendo considerada baixa (ROCHA, 1997).

Segundo Camponogara (2006), se for considerada uma espessura de 250m e uma porosidade efetiva de 15%, as reservas do SAG podem ser estimadas em 45.000km³. Entretanto, segundo os estudos realizados pela OEA (2009), a porosidade média dos arenitos do aquífero é de 15% \pm 2% e o seu volume explorável de 32.830,6km³ \pm 4.400km³. Destaca-se que o volume total do aquífero é superior a este citado, porém devido as condições técnicas (altura máxima de bombeamento de 400m) e ao tempo que a água demora a infiltrar em algumas áreas distantes dos afloramentos, este é o volume disponível para que ocorra a exploração de forma sustentável.

Figura 5: Perfil esquemático



Fonte: OEA, 2009

4.2. Hidrogeologia

4.2.1. Considerações Gerais

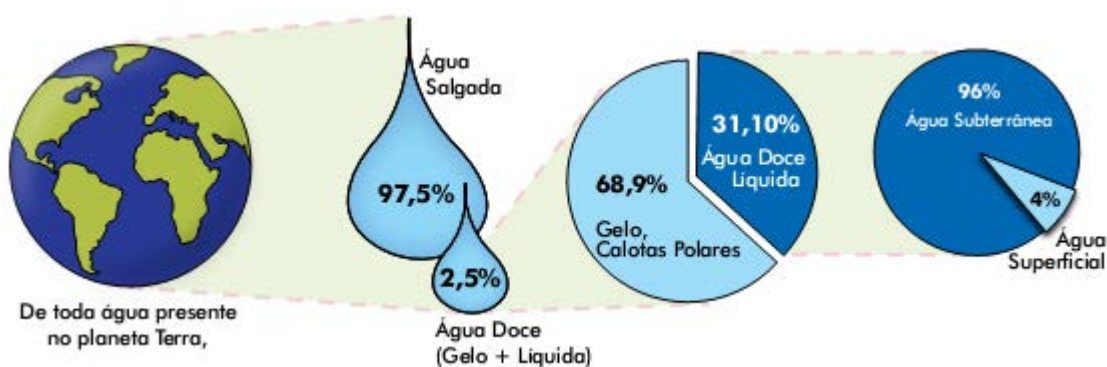
A estimativa da quantidade de água presente no Planeta se dá através de métodos complexos devido a sua constante movimentação e mudança de estado. Para isso são contabilizados a água presente na hidrosfera, nos estados líquido e sólido, e na atmosfera no estado, gasoso.

Dos 510 milhões de km² da superfície terrestre, 70% estão encobertos por água, representando aproximadamente 360,6 km². Estima-se que o volume total de água do planeta

seja de aproximadamente 1.385.984.610 km³ dos quais 97,5% (1,351 bilhões de km³) sejam de águas salgadas distribuídas em oceanos e mares. E apenas 2,5% (34,6 milhões de km³) sejam de águas doces que se encontram em rios, lagos, calotas polares, aquíferos e na umidade de solos (SHIKLOMANOV, 1998; MMA, 2007).

Entretanto, da água doce existente na Terra, apenas 0,9% corresponde à umidade do solo e pântanos, 0,3% aos rios e lagos, 68,9% (23,83 milhões de km³) formam as calotas polares, geleiras e neves eternas e os 29,9% (10,3 milhões de km³) restantes são águas subterrâneas. Sendo assim, do total disponível para consumo, descontando-se a água em estado sólido, as águas subterrâneas representam um total de 96%, conforme apresentado na Figura 6 (MMA, 2007).

Figura 6: Distribuição de água no Planeta



Fonte: MMA (2007)

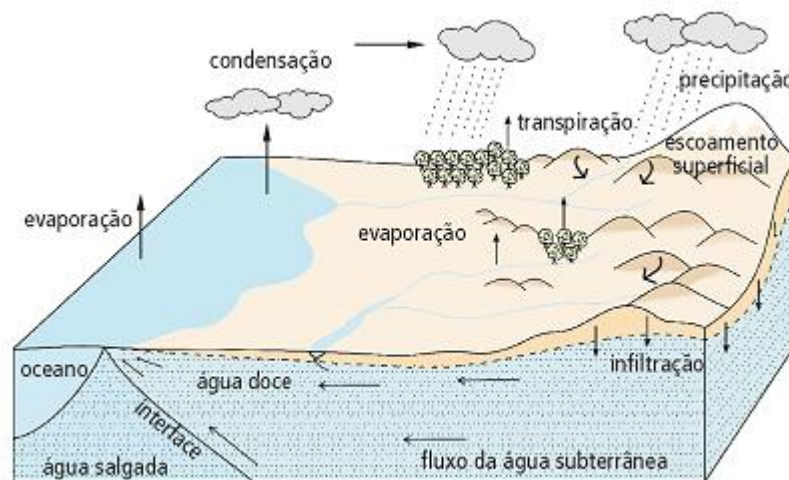
É possível afirmar que essa distribuição representa o planeta como um todo, no entanto, a realidade da disponibilidade hídrica de cada país ou região é bastante variável. Fatores como clima, pluviosidade, população e cobertura vegetal são fundamentais para determinar sua abundância ou ausência.

4.2.2. Base Conceitual

O ciclo hidrológico representa a movimentação da água entre seus reservatórios na superfície (oceanos, rios, lagos e geleiras) e na subsuperfície, a atmosfera e a biosfera. Admitindo-se o volume de água constante, pode-se iniciar o ciclo hidrológico a partir da precipitação. O vapor de água contido na atmosfera condensa-se originando as chuvas. Parte da precipitação evapora antes de chegar ao solo. Essa parcela, juntamente com o evaporado da superfície terrestre e o vapor de água liberado pela atividade biológica, representam a evapotranspiração (TEIXEIRA et al, 2000; BORGHETTI et al. 2004).

Após atingir o solo, a água pode seguir dois caminhos. Um deles é a infiltração que, guiado pela gravidade e dependente das características do solo, caminha em direção vertical preenchendo os vazios do solo até atingir um reservatório subterrâneo abastecendo-o. O outro caminho a ser seguido é o escoamento superficial, governado pela declividade do terreno e também pela gravidade. O escoamento superficial começa a partir do momento em que a precipitação supera a capacidade de absorção do solo. A partir daí o excesso de água começa a escoar para as áreas mais baixas convergindo para os rios e estes desaguando nos oceanos (BORGHETTI et al. 2004). Dos reservatórios subterrâneos, a água retorna a superfície através do seu afloramento ou realimentando rios, lagos e oceanos. Com isso e, novamente com a evaporação dos corpos d'água, fecha-se o ciclo hidrológico (Figura 7).

Figura 7: Ciclo hidrológico



Fonte: IRITANI; EZAKI, 2009

Segundo Tucci e Beltrame (2000), a infiltração é a passagem da água para o interior do solo. Depende da natureza do mesmo, do estado de sua superfície e da quantidade de água disponível para infiltrar. À medida que a água vai infiltrando, os poros das camadas superiores serão ocupados formando um perfil no qual a umidade decresce com a profundidade. Conforme a infiltração vai diminuindo, a água em subsuperfície vai se distribuindo para as camadas inferiores com umidade reduzida formando um perfil com menores teores de umidade próximos à superfície.

Entretanto, o processo de infiltração não é tão simples dependendo de vários fatores, dentre eles: tipo de chuva, inclinação do terreno, cobertura vegetal e grau de ocupação. Chuvas finas e mais demoradas levam mais tempo para saturar o solo, permitindo que uma maior quantidade de água se infiltre, ao passo que chuvas mais intensas saturam o solo

rapidamente. Em terrenos mais acidentados, o escoamento superficial é favorecido, enquanto que em áreas com relevo mais suave a infiltração é predominante. Em áreas com cobertura vegetal, as raízes abrem espaços no solo permitindo a infiltração, além disso, as folhas interceptam parte da água precipitada, retardando o escoamento e aumentando a evaporação. O grau de ocupação do solo é traduzido pela taxa de impermeabilização do mesmo. Em áreas como os grandes centros urbanos, onde praticamente todo o solo é impermeabilizado, a taxa de infiltração é muito baixa, aumentando significativamente o escoamento superficial e causando grandes transtornos às cidades (TEIXEIRA et al, 2000).

Além das características citadas acima, há ainda duas propriedades dos materiais geológicos que influenciam a movimentação da água no subsolo. Uma delas é a porosidade, ou seja, a quantidade de vazios presentes em um meio poroso, nos quais a água é armazenada e transportada. Ela depende da forma, do grau de compactação e da distribuição do tamanho das partículas. A forma das partículas interfere no modo em que elas se arranjam entre si, formatos irregulares resultam em porosidade maior do que as formas arredondadas. Formações geológicas com grau de compactação ou cimentação maior apresentam menor valor de porosidade. Formações que apresentam uma distribuição irregular dos grãos têm porosidade reduzida, pois as partículas menores ocupam a porção do volume deixado pelas partículas maiores. Além da porosidade, outra propriedade fundamental é a permeabilidade, ela representa a capacidade em permitir o fluxo de água através dos poros e tem como fatores determinantes o tamanho dos poros e a conexão entre eles (TUCCI; BELTRAME, 2000).

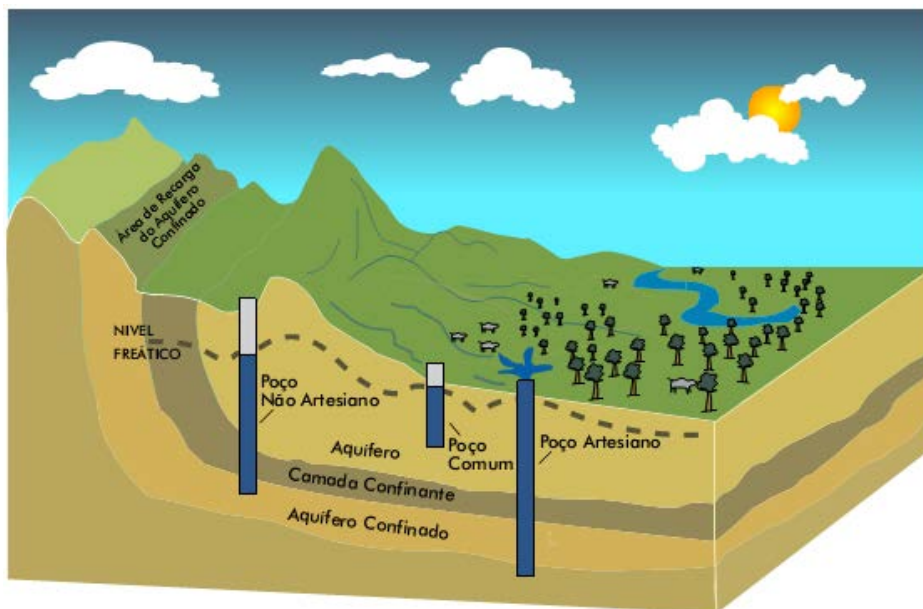
Feitosa e Manoel Filho (2008) definiram infiltração como a quantidade de água que certo tipo de solo é capaz de absorver e esta seria decrescente com o tempo, a medida que o meio se torna saturado. A água infiltrada pode ser encontrada em duas regiões. A primeira, mais superficial, é a zona não saturada onde a água divide os poros com o ar. Após percolar por esta zona alcança a segunda região denominada de zona saturada, onde os poros estão completamente preenchidos por água. A superfície de contato entre as duas zonas recebe várias denominações como superfície freática, lençol freático e nível d'água (N.A.).

Segundo Feitosa e Manoel Filho (2008), água subterrânea é toda água encontrada ou abaixo do nível freático presente, ou nas formações aflorantes e parcialmente saturadas, ou nas formações profundas totalmente saturadas. Seus reservatórios podem ser classificados de acordo com a capacidade de transmissão em: aquíferos, aquícludes, aquíquardos ou aquífugos. Geralmente compostos por materiais de granulometria maior e mais homogêneo, os aquíferos apresentam elevados valores de capacidade de armazenamento e transmissividade. Os aquícludes apresentam granulometria menor e são mais heterogêneos que os aquíferos logo

seu armazenamento e transmissividade são reduzidos. Já os aquítardos, apesar de serem capazes de armazenar quantidades significativas de água, o fluxo em seu interior é muito baixo. Por fim, os aquífugos são camadas praticamente impermeáveis incapazes de estocar e transmitir a água.

Os aquíferos ainda podem ser diferenciados quanto a sua posição estratigráfica (Figura 8) e porosidade da rocha armazenante. No que diz respeito à posição estratigráfica os aquíferos livres são aqueles próximos à superfície aflorante em toda a sua extensão e, na sua parte inferior, limitado por uma formação impermeável ou semipermeável. O N.A. varia de acordo com o volume de chuvas e a pressão no nível freático e é igual a pressão atmosférica. Esses aquíferos são os mais explorados e, conseqüentemente, são os mais susceptíveis a impactos ambientais. Os aquíferos confinados são aqueles com a formação geológica permeável e confinada entre duas formações impermeáveis. A pressão da água é maior que a pressão atmosférica, causando artesianismo nos poços. A recarga ocorre em locais onde a formação permeável é aflorante ou baixa permeabilidade das rochas confinantes (BORGHETTI et al. 2004).

Figura 8: Classificação dos aquíferos quanto à posição estatigráfica

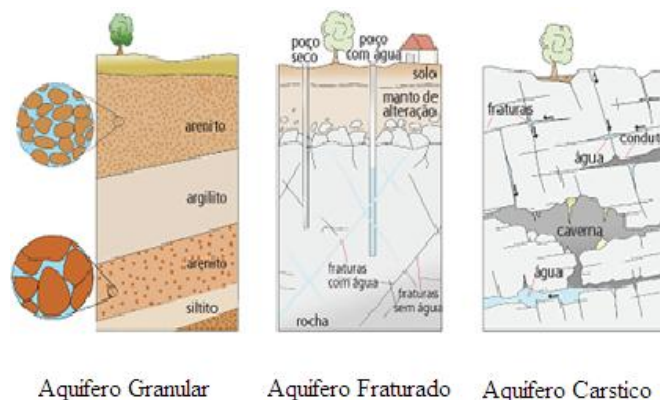


Fonte: MMA (2007)

Entretanto, quando classificado em termos de porosidade da rocha armazenante (Figura 9), os aquíferos dividem-se em porosos ou granulares, fraturados e carstícos. Os aquíferos porosos são aqueles constituídos por rochas sedimentares ou sedimentos inconsolidados em que a água ocupa seus poros. Por ocorrer em bacias sedimentares, eles

formam os aquíferos mais importantes devido ao grande volume de água que armazenam. Outro tipo de aquífero são os fraturados ou fissurais, nos quais a capacidade de armazenamento está relacionada a quantidade de fraturas. São constituídos por rochas metamórficas ou ígneas. Os poços que exploram esses aquíferos apresentam vazões variadas, pois dependem da presença de fraturas com capacidade de transportar água. O último tipo de aquífero são os aquíferos carstícos formados por rochas calcárias ou carbonáticas devido à dissolução do carbonato pela água (IRITANI; EZAKI, 2009).

Figura 9: Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade



Fonte: Adaptado de IRITANI; EZAKI, 2009

4.3. Vulnerabilidade Natural

4.3.1. Conceitos Gerais

Assim como as águas superficiais, as águas subterrâneas também têm suas limitações quanto à disponibilidade e estão suscetíveis a contaminação de poluentes que se infiltram pelo solo. A tendência do consumo dos recursos hídricos subterrâneos é aumentar, tanto pelo aumento populacional como pelo crescimento econômico, devido as suas vantagens frente às águas superficiais. Entretanto a exploração atual é feita de forma negligente sem que normas e técnicas de segurança sejam levadas em consideração (HIRATA; SUHOGUSOFF, 2004). Dessa forma, os aquíferos estão expostos aos impactos da exploração desmedida e da ocupação desordenada do solo, que colocam a qualidade deste recurso em risco.

O conceito de vulnerabilidade pode ser interpretado como sendo o conjunto de características intrínsecas dos estratos acima da zona saturada. Estas determinam a sensibilidade do aquífero ao ser atingido por uma carga poluidora. A determinação da

vulnerabilidade está associada à capacidade de atenuação da zona não saturada, por meio da estimativa e integração de vários fatores hidrogeológicos e litológicos, tendo sido desenvolvidos diversos métodos de análise (HIRATA, 1994).

Segundo Hirata e Ferreira (2001), a vulnerabilidade é consequência das propriedades físico-químicas e hidráulicas do solo, rocha ou sedimentos que compõem a zona não saturada e que possibilita a dispersão, retardamento e degradação do contaminante. Ela age de forma eficaz na degradação de poluentes por meio dos processos de advecção, diluição, eliminação e retardamento. É a primeira e mais importante proteção natural contra contaminantes. Isso se deve ao fato que seu ambiente físico-químico é favorável a atenuação ou até mesmo à eliminação de poluentes.

Para Bós e Thomé (2012) a vulnerabilidade está relacionada a um conjunto de fatores que influenciam a qualidade e potencializam a sua contaminação. A combinação das características do meio físico, da biota, do tipo de poluente e a relação entre os meios e os processos faz cada manancial subterrâneo um sistema único que, na maioria das vezes, precisa de soluções combinadas para seu uso sustentável. Portanto, as características que tem estreita ligação com a vulnerabilidade do aquífero são:

- Tipo de aquífero: Aquíferos confinados como o Guarani apresentam maior proteção quando comparado aos aquíferos livres, pois a cobertura por estratos de menor condutividade hidráulica e a presença de litologias pelíticas são uma proteção às águas.
- Profundidade do nível d'água: A distância entre a superfície e o nível d'água também é fundamental para avaliação da vulnerabilidade, sobretudo quando se trata de compostos degradáveis (HIRATA, 1994). Uma distância maior representa maior tempo de deslocamento e uma maior degradação. Apesar de importante, quando se trata de poluentes com grande mobilidade e persistência, como sais e nitratos, este parâmetro tem sua eficácia limitada.
- Permeabilidade: Valores de permeabilidade baixos significam que a zona vadosa funciona como uma barreira a penetração de contaminantes. Aquíferos de grande extensão, como o Guarani, geralmente são confinados e apresentam algumas zonas de recarga. Estas, na maioria dos casos, apresentam elevada permeabilidade permitindo a difusão de poluentes. O avanço da pluma de contaminação é acelerado pela utilização de poços, uma vez que aumenta a velocidade do fluxo subterrâneo em direção das áreas exploradas.

- Teor de matéria orgânica: A presença de matéria orgânica no solo tem capacidade de adsorver vários metais pesados e moléculas orgânicas.
- Teor de óxidos e minerais de argila: Segundo Bós e Thomé (2012), estes compostos possuem a capacidade de reter uma série de elementos devido suas cargas químicas superficiais. Em solos contaminados com nitrato, por exemplo, a adição de gesso aumenta o consumo de nitrogênio pelas plantas reduzindo a penetração de nitrato no solo.
- Reações químicas e biológicas: Ao atingir o solo, o contaminante pode passar por uma série de reações químicas, bioquímicas e inter-relações com os constituintes do solo até atingir o lençol freático. Essas reações podem modificar, atenuar ou até mesmo neutralizar os poluentes.

Segundo Hirata (1994), são dois os mecanismos que regem o fluxo de contaminantes em subsuperfície, a advecção e a dispersão. O primeiro é um processo hidráulico pelo qual o soluto é carregado pelo fluxo das águas subterrâneas. É proporcional à condutividade hidráulica e ao gradiente hidráulico e inversamente proporcional à porosidade efetiva. Quanto maiores os valores de advecção, maiores serão os volumes de água afetados. A dispersão é o processo em que o soluto se mistura com as águas não contaminadas. Ela tem o papel de atenuação de poluentes conservativos e móveis. E quanto maior a capacidade de dispersão do meio, menos vulnerável o aquífero será.

De acordo com Foster *et al* (2006), a vulnerabilidade à poluição de um manancial expressa sua sensibilidade ao ser afetado por um poluente. A caracterização da vulnerabilidade pode ser traduzida por meio da acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes e da capacidade de atenuação natural, resultante da retenção físico-química ou reações do poluente com o solo. Estes dois fatores naturais se relacionam com algumas características do poluente, sendo estas o modo de dispersão no solo ou subsuperfície, a mobilidade físico-química e a persistência do poluente.

O mesmo autor define a vulnerabilidade como sendo o exame das características intrínsecas da zona não saturada, determinando a sensibilidade da mesma frente a uma carga poluente. O perigo ou risco de contaminação das águas subterrâneas esta relacionada à possibilidade de ocorrer contaminação. Portanto, uma área pode apresentar alta vulnerabilidade em razão de suas características e ao mesmo tempo baixo risco, devido às atividades locais apresentarem ausência ou baixo volume de carga contaminante.

A determinação do risco de contaminação tem o papel de identificar quais mananciais são mais frágeis à contaminação causada pelas atividades humanas, assim como quais dessas atividades apresentam maior risco para uma dada área. Dessa maneira, o perigo de contaminação pode ser definido como sendo a interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e as atividades antrópicas sobre ele. Os estudos que tem esse objetivo devem identificar quais são as áreas mais suscetíveis bem como quais ações são responsáveis pelos maiores riscos de contaminação (OSÓRIO, 2004).

4.3.2. Métodos para avaliação da vulnerabilidade

A complexidade de um método de avaliação da vulnerabilidade está diretamente relacionada à quantidade de fatores considerados, e na prática a disponibilidade de dados é o que determina o método a ser utilizado, entretanto, nem sempre a quantidade de dados requeridos está disponível. Em locais como o Brasil, onde esse tipo de estudo ainda é incipiente, a escassez de dados é uma realidade. Para essas situações, Foster e Hirata em 1988 desenvolveram um método denominado GOD (OSÓRIO, 2004). A Tabela 1 apresenta os dados necessários e os que geralmente estão disponíveis para aplicação do método.

Tabela 1: Dados para determinação da vulnerabilidade do aquífero

Componente da vulnerabilidade	Dados hidrogeológicos	
	Idealmente necessários	Normalmente disponíveis
Inacessibilidade hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • grau de confinamento • profundidade do nível d'água • condutividade hidráulica vertical e teor de umidade da zona não saturada 	<ul style="list-style-type: none"> • tipo de confinamento • profundidade do nível d'água
Capacidade de atenuação	<ul style="list-style-type: none"> • granulometria dos sedimentos e fissuras na zona vadosa • mineralogia dos estratos na zona vadosa 	<ul style="list-style-type: none"> • grau de consolidação ou fissuração da zona vadosa ou camada confinante • característica litológica desses estratos

Fonte: Adaptado de Foster *et al* (2006)

Em sua avaliação, o método considera apenas três parâmetros relativos à capacidade de atenuação e inacessibilidade hidráulica dos poluentes. O parâmetro **G** representa a ocorrência de camadas geológicas, pois estas interferem diretamente na velocidade do fluxo subterrâneo, é classificado em uma escala de 0 a 1,0. O índice **O** indica a capacidade de atenuação natural dos estratos da zona não saturada, levando em consideração o grau de consolidação das partículas e a capacidade de retenção do meio. Deve ser apresentado em uma escala de 0,3 até 1,0. Por fim, o índice **D** avalia a distância entre o lençol freático e a superfície do terreno e seus valores representados em uma escala de 0,4 a 1,0 (FOSTER; HIRATA, 1987).

O produto dos três fatores origina um índice (Tabela 2) de vulnerabilidade que traduz o grau de vulnerabilidade natural do aquífero. Este pode ser classificado em insignificante, baixo, médio, alto e extremo.

Tabela 2: Classificação Método GOD

Classe de Vulnerabilidade	Definição
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes, exceto àqueles que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados
Média	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores a longo prazo
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo

Fonte: Adaptado de Foster *et al* (2006)

Assim como o método GOD, o DRASTIC avalia a vulnerabilidade intrínseca do aquífero. Proposto por Aller *et al* (1987), baseia-se em variáveis hidrogeológicas para determinar a vulnerabilidade das águas subterrâneas. Ele corresponde ao somatório ponderado de sete parâmetros, sendo eles: (**D**) profundidade do lençol freático, (**R**) recarga do aquífero, (**A**) tipo de aquífero, (**S**) tipo de solo, (**T**) topografia, (**I**) impacto da zona não saturada e (**C**) condutividade hidráulica. Para cada fator citado acima é atribuído um valor de 1 a 5 de acordo com gráficos e tabelas.

Cada variável tem um peso e a partir do somatório chega-se ao resultado do índice dividido em sete classes. Sendo elas: Insignificante (<100), Muito Baixa (101–119), Baixa (120–139), Moderada (140–159), Alta (160–179), Muito Alta (180–199) e Extrema (>200).

Outro método que leva em conta poucos fatores, mas apresenta resultados satisfatórios (BRAGA, 2008; FRANCISCO, 2013), é o método apresentado por Henriot (1975) baseado na Condutância Longitudinal (S). Assim como já explicitado no item 4.2.3, a Condutância Longitudinal é um dos parâmetros de Dar Zarrouk, que representa a razão entre a espessura e a resistividade elétrica da camada.

Sendo assim, no caso do aquífero Guarani confinado, elevados valores de S indicariam que a camada de basalto sobrejacente ao SAG apresenta baixa resistividade, isto é a rocha apresenta-se mais impermeável, além de possuir uma espessura considerável. Já valores mais baixos indicaram que as rochas apresentam maior número de fraturas e poros, tornando-as mais permeáveis, além disso, possuem uma espessura menor.

Devido a grande quantidade de parâmetros a serem integrados e a apresentação dos resultados na forma de mapas temáticos, as técnicas de geoprocessamento são fundamentais para a avaliação, integração dos dados e produção dos mapas de vulnerabilidade, pois agiliza o processo ao automatizá-los

O mapeamento da vulnerabilidade geralmente é a primeira etapa na avaliação do perigo de contaminação e na proteção da qualidade das águas subterrâneas. Além disso, é uma valiosa ferramenta na gestão dos recursos hídricos, pois é através dele que se podem determinar regiões mais ou menos suscetíveis a contaminação, em razão do uso e ocupação do solo incorretos. Este tipo de mapa associa diversas categorias de informações e estas, por sua vez, refletem as propriedades ou a capacidade de proteção de cada tipo de material geológico frente a uma possível carga contaminante.

Segundo Foster *et al* (2006), o método de mapeamento da vulnerabilidade consiste na valoração de índices correspondentes a sensibilidade de um aquífero ao ser atingido por um contaminante. O método desenvolvido por eles se baseia nos processos de recarga do aquífero e na capacidade natural de atenuação dos estratos geológicos.

De acordo com Meaulo (2004), um método de avaliação da vulnerabilidade não deve ser interpretado como um manual que determina todas as variáveis para gerenciar as diversas atividades poluidoras e as complexas condições hidrogeológicas. No entanto, a estimativa da vulnerabilidade um instrumento que serve para prever e orientar as questões correlatas ao planejamento e ao uso e ocupação do solo, uma vez que nele são definidas áreas com maior ou menor risco à poluição.

O mesmo autor esclarece que, a nomenclatura de cada classe tem caráter restritivo, representando a sensibilidade das camadas geológicas e as características hidrogeológicas do aquífero. Porém, vale ressaltar que as classes de vulnerabilidade não possuem caráter proibitivo para uso e ocupação do solo. Mas aconselha-se a realização de investigações detalhadas dependendo da classe atribuída para uma determinada área.

4.4. Geofísica

4.4.1. Considerações Gerais

No início, a geofísica, que se baseia em técnicas físicas e matemáticas teve seu desenvolvimento relacionado à exploração do subsolo, investigando estruturas propícias ao acúmulo de água, petróleo e minerais. Entretanto, a geofísica, principalmente os métodos geoeletricos, vem se destacando nos estudos relacionados à contaminação do meio físico, como, por exemplo, resíduos de aterros sanitários e vazamentos de combustíveis (BRAGA, 2006).

A parte sólida da Terra é objeto de estudo, tanto do geofísico como do geólogo, ambos buscam, por metodologias diferentes, alcançar os mesmos objetivos: entender os fenômenos que ocorrem no interior do planeta. Segundo Braga (2007), os fenômenos naturais investigados pela geofísica são: o campo magnético terrestre, fluxo geotérmico, propagação de ondas sísmicas, campo gravitacional e campos elétricos e eletromagnéticos.

Esses fenômenos são estudados a partir dos métodos geofísicos, com destaque para os métodos gravimétricos, magnetométrico, geoeletrico e sísmicos. Os dois primeiros são de campo natural e estudam as interferências causadas por estruturas ou corpos em um campo preexistente. Já nos métodos geoeletricos e sísmicos, os campos físicos a serem estudados são artificiais, com exceção do método do potencial espontâneo (ELIS, 1998).

Os métodos geofísicos fundamentam-se nas propriedades dos materiais que compõe os meios geológicos e nos contrastes que estas propriedades possam apresentar. Destaca-se o fato que intervenções humanas podem alterar essas propriedades, sendo possíveis de serem detectadas (GALLAS, 2000).

Segundo Elis (1998), a geofísica se utiliza de parâmetros físicos dos materiais terrestres para investigar feições geológicas em subsuperfície, como água e petróleo. A aplicação da geofísica justifica-se, pois as propriedades físicas dos materiais (velocidade de

propagação de ondas, condutividade elétrica, entre outras) variam de acordo com fatores como, mineralogia, teor de umidade, faturamento, porosidade, entre outros. Desse modo, pode-se identificar um material em subsuperfície através do conhecimento da resposta de um desses parâmetros físicos para este material.

Segundo o mesmo autor, em estudos relativos a águas subterrâneas, os métodos elétricos e seus parâmetros condutividade elétrica e resistividade são de fundamental importância para obtenção de informações relativas ao meio e possíveis contaminantes.

4.4.2. Método da Eletroresistividade

O método da eletroresistividade baseia-se na estimativa da resistividade (ρ) dos materiais. Nos ambientes geológicos, a resistividade auxilia na determinação de algumas de suas características como: grau de alteração, faturamento, saturação e litologia (Braga, 2006).

Através de uma corrente I introduzida no solo por dois eletrodos, gera-se um campo elétrico. O potencial elétrico ΔV produzido por esse campo é medido por dois outros eletrodos, permitindo-se calcular a resistividade da subsuperfície pela fórmula:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (1)$$

Onde K é a relação entre os espaçamentos entre os eletrodos considerados, independentemente do arranjo escolhido.

A condução da corrente elétrica pode ocorrer de dois modos. Um deles é a condução eletrônica, no qual a corrente se propaga através das rochas que compõe o meio geológico. A propagação ocorre pelo movimento dos elétrons livres, entretanto essa disponibilidade de elétrons ocorre somente em rochas constituídas por minerais metálicos, como por exemplo, magnetita, grafita e pirita. O outro modo é a condução iônica ou eletrolítica, na qual a corrente é transmitida através de íons contidos em um eletrólito (ORELLANA, 1972).

A resistividade das rochas varia de acordo com os seguintes fatores: resistividade dos materiais que as compõem, resistividade dos gases e líquidos presentes em seus poros, umidade, porosidade, textura das rochas e a forma e distribuição de seus poros, o que torna os tipos litológicos caracterizados por uma faixa de valores e não um valor determinado (GALLAS, 2000).

A resistividade é inversamente proporcional à quantidade de água e de sais dissolvidos. Quando a rocha encontra-se completamente saturada, o volume total de água

pode ser relacionado à porosidade do material, porém isso nem sempre acontece, podendo haver ar ou até mesmo petróleo ocupando os poros. Para haver uma boa condutividade, os poros precisam estar preenchidos com água e interligados. Rochas que apresentam elevada quantidade de água armazenada, mas os poros não estão interligados apresentam elevada resistividade, pois, apesar da quantidade de água, a baixa interconexão dificulta a passagem de corrente.

Segundo Gallas (2000), materiais com baixa porosidade, como as rochas ígneas, metamórficas e folhelhos maciços, apresentarão elevados valores de resistividade. Materiais que não contenham água nos poros, ou que a água seja livre de sais também terão altos valores de resistividade.

A escolha da técnica, ou seja, os procedimentos adotados para se obter o parâmetro físico desejado, dependerá dos objetivos da investigação permitindo estudar as variações de resistividade em profundidade ou lateralmente. Em investigações laterais, as variações do parâmetro ocorrem devido a falhas, diques, plumas de contaminação e até mesmo o contato entre formações. Nesse tipo de investigação o espaçamento entre os eletrodos mantem-se fixos, deslocando o arranjo ao longo de um perfil. No entanto, em estudos da variação da resistividade com a profundidade, aumenta-se gradativamente a abertura dos eletrodos de emissão de corrente, a fim de alcançar níveis de investigação mais profundos, enquanto o centro do arranjo permanece fixo no ponto de interesse.

4.4.3. Sondagem Elétrica Vertical

A técnica da sondagem elétrica vertical é utilizada quando se deseja investigar em profundidade os diferentes materiais geológicos e suas características através da estimativa de sua espessura e resistividade. Ela consiste em uma sequência de medições da resistividade aparente a partir do aumento do espaçamento entre os eletrodos de emissão. As medidas feitas em superfície são ditas aparentes, uma vez que os valores obtidos representam a média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície (BRAGA, 2007). Deste modo, a investigação da resistividade aparente ocorre em um ponto fixo a uma profundidade cada vez maior, pois devido ao fato da corrente dissipar-se radialmente, quanto maior o espaçamento entre os eletrodos de injeção de corrente maior a profundidade investigada.

As SEV's apresentam melhores resultados, quando utilizadas em meios com estratificação plano paralela e que apresentem homogeneidade lateral em relação ao

parâmetro estudado. Essa técnica tem vasta aplicação em estudos sobre Geologia de Engenharia, Hidrogeologia e Geologia do Petróleo. Suas principais características são o alinhamento simétrico dos eletrodos e a fixação dos centros dos dipolos de recepção de potencial e da direção do arranjo (GALLAS, 2000).

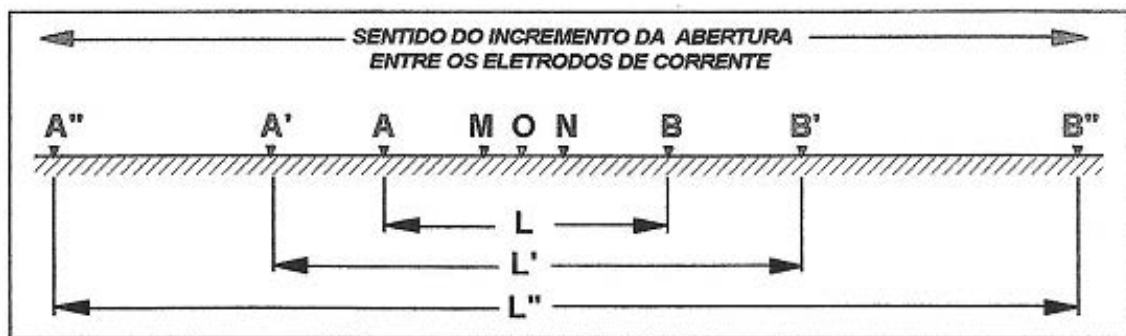
Dentre os vários tipos de arranjos com os quais as SEV's podem ser desenvolvidas, o Arranjo Schlumberger é o mais utilizado, devido à facilidade e rapidez de sua execução, além de apresentar boa qualidade nas curvas de campo. Esse arranjo é composto por dois pares de eletrodos, um para a introdução de corrente no meio (AB) e outro para medir o potencial gerado (MN), alinhados sobre um mesmo perfil de levantamento conforme Figura 4. O ponto sob investigação será o centro do arranjo. Os eletrodos MN localizam-se na parte interna do arranjo permanecendo fixo na maior parte do tempo, enquanto que o par AB será movimentado sempre de dentro para fora, pois quanto maior o espaçamento AB, maior a profundidade investigada. Através das equações abaixo, o valor da resistividade aparente é obtida para a profundidade investigada (ELIS, 1998; GALLAS, 2000; BRAGA, 2007).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (2)$$

$$K = \frac{\pi(AM \cdot AN)}{MN} \quad (3)$$

Onde K é o fator geométrico que depende do espaçamento AMNB.

Figura 10: Técnica de Sondagem Elétrica Vertical – Arranjo Schlumberger

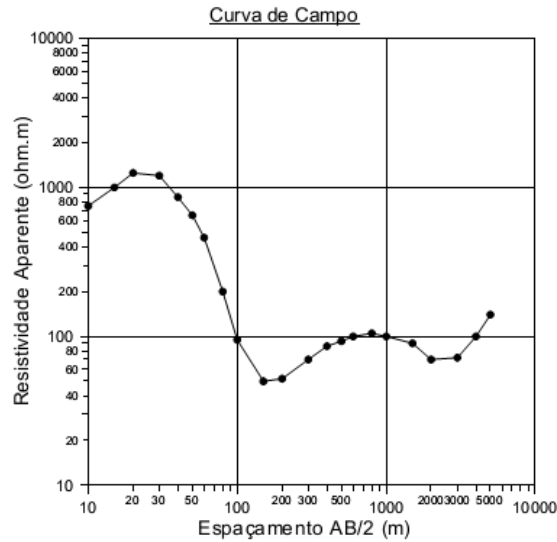


Fonte: Gallas (2000)

Deve-se ressaltar que a relação $MN \leq AB/5$ deve ser respeitada a todo o momento, de modo a reduzir os efeitos de interferências externas. Apesar de ser mantido fixo na maior parte do tempo, quando a recepção do sinal no par MN torna-se fraca deve ser feita uma operação conhecida como embreagem. Ela nada mais é que a repetição de leitura da diferença de potencial com duas ou mais aberturas MN para uma mesma abertura AB (ELIS, 1998).

Os valores de resistividade obtidos são plotados em um gráfico bi-logaritmico, cujos eixos das ordenadas e das abscissas representam, respectivamente, os valores de resistividade obtidos em ohm.m e o espaçamento AB/2 em metros (Figuras 11).

Figura 11: Exemplo de curva de campo

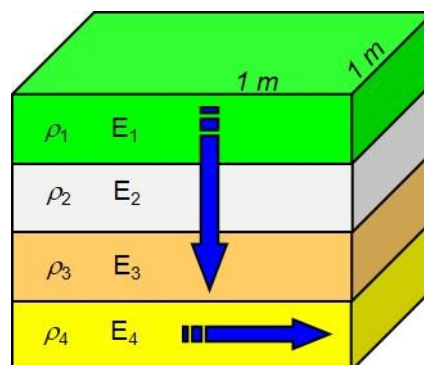


Fonte: Braga (2006).

4.4.4. Parâmetros de Dar Zarrouk

Em subsuperfície a corrente elétrica pode fluir por dois caminhos preferenciais. Um paralelo a estratificação e outro perpendicular às camadas. Os parâmetros de Dar Zarrouk expressam a relação, tanto pela multiplicação como pela divisão, entre a espessura das camadas geoeletricas e sua resistividade (Figura 12) (BRAGA, 2007).

Figura 12: Parâmetros de Dar Zarrouk



Fonte: adaptado de Braga (2007).

Segundo Braga (2007) e Carlos (2010), a resistência transversal unitária (T), um dos parâmetros de Dar Zarrouk, representa a resistência da camada à passagem de corrente no sentido vertical. Nela os estratos funcionam como condutores elétricos em série, onde a resistência total corresponde à soma das resistências das camadas. Supondo uma camada com espessura E_i e comprimento e profundidades iguais a 1m ($S=1\text{m}^2$) a resistência transversal é dada por:

$$R_i = \rho_i \frac{L}{S} = \rho_i \frac{L}{1 \times 1} = \rho_i E_i \quad (4)$$

Este produto é denominado de resistência transversal unitária (T), resultando, portanto:

$$T_i = \rho_i E_i \quad (5)$$

Em um conjunto com n camadas:

$$T_i = \sum_i \rho_i E_i \quad (6)$$

A dimensão de T é a de uma resistividade por uma longitude e sua unidade é Ωm^2 .

No sentido paralelo a estratificação, e partindo das mesmas suposições sobre as dimensões da camada (comprimento e profundidade iguais a 1m) a resistência R_i é dada por:

$$R_i = \rho \frac{L}{S} \Rightarrow R_i = \rho \frac{1}{E.1} \Rightarrow R_i = \frac{\rho_i}{E} \quad (7)$$

Nesta disposição, as camadas comportam-se como condutores em paralelos de modo que suas resistências não podem ser somadas, entretanto, a inversa da resistência, isto é, a condutância (S_i) possui a propriedade aditiva.

Assim, chega-se ao segundo parâmetro de Dar Zarrouk, a condutância longitudinal unitária S_i .

$$S_i = \frac{1}{R_i} = \frac{E_i}{\rho_i} \quad (8)$$

A condutância longitudinal correspondente a n camadas é dada por:

$$S_i = \sum_i \frac{E_i}{\rho_i} \quad (9)$$

Tanto o parâmetro resistência transversal como a condutância longitudinal são de fundamental importância no auxílio a interpretações de SEV's e no entendimento de modelos geoeletricos, além de auxiliar na caracterização de aquíferos. A resistência transversal correlaciona-se com a transmissividade do aquífero indicando a produtividade do mesmo. Já a condutância longitudinal de camadas superiores a ele pode ser empregada em estudos sobre vulnerabilidade (CARLOS, 2012). No trabalho de Braga (2008), foi aplicado o parâmetro condutância longitudinal para estudo da proteção natural do aquífero livre. Os resultados

permitiram identificar áreas de maior vulnerabilidade, com maiores restrições a instalações de fontes possivelmente poluidoras.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais

Para realização do presente trabalho, foram utilizadas 73 SEV's executadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1981), em apoio aos estudos geológicos da região de Bauru realizados pelo Consorcio Paulipetro. Através delas, objetivou-se a caracterização dos estratos em subsuperfície e a estimativa de parâmetros hidrogeológicos e geoeletricos, assim como profundidade do N.A., cota altimétrica e espessura dos estratos geológicos e resistividade elétrica (IPT e UNESP, 2013).

Para a confecção dos mapas, além das sondagens, utilizou-se arquivos tipo *shapefile* (IBGE, 2007) e mapas da região no formato *raster* (DAEE; IGC, 2003) que foram digitalizados parcialmente para extração de algumas informações como: rodovias de acesso, formações aflorantes, hidrografia e UGRHI's. A Tabela 3 traz a relação dos materiais utilizados na realização do trabalho.

Tabela 3: Dados utilizados

Material	Fonte	Ano	Quantidade
SEV's	IPT/Paulipetro (Bloco 45)	1980 e 1981	73
Mapa Geológico do Estado de São Paulo – Folhas Bauru e Marília (escala 1 : 250.000)	DAEE/UNESP	1984	2
Malha Digital dos Municípios – SP	IBGE	2007	1
Mapa das UGRHI's do Estado de São Paulo (escala 1 : 1.000.000)	DAEE/IGC	2003	1

Fonte: Elaborado pelo Autor

Devido a época em que as sondagens foram realizadas, os dados obtidos encontravam-se impressos, porém muitas dessas folhas apresentavam certo grau de deterioração. Para sua utilização no trabalho, as mesmas foram digitalizadas por meio do *software* Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007). Posteriormente, algumas das SEV's foram reinterpretadas com o auxílio do *software* IX1D (INTERPREX LIMITED, 2008), para melhor definição de seus modelos geoeletricos.

Para confecção dos mapas utilizou-se o *software* QGIS versão 2.8.2 – Wien (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2015) cujas operações realizadas foram:

1. Localização das SEV's;
2. Delimitação da área de estudo;
3. Digitalização dos mapas de formato *raster*;
4. Interpolação dos dados obtidos;
5. Elaboração dos mapas finais.

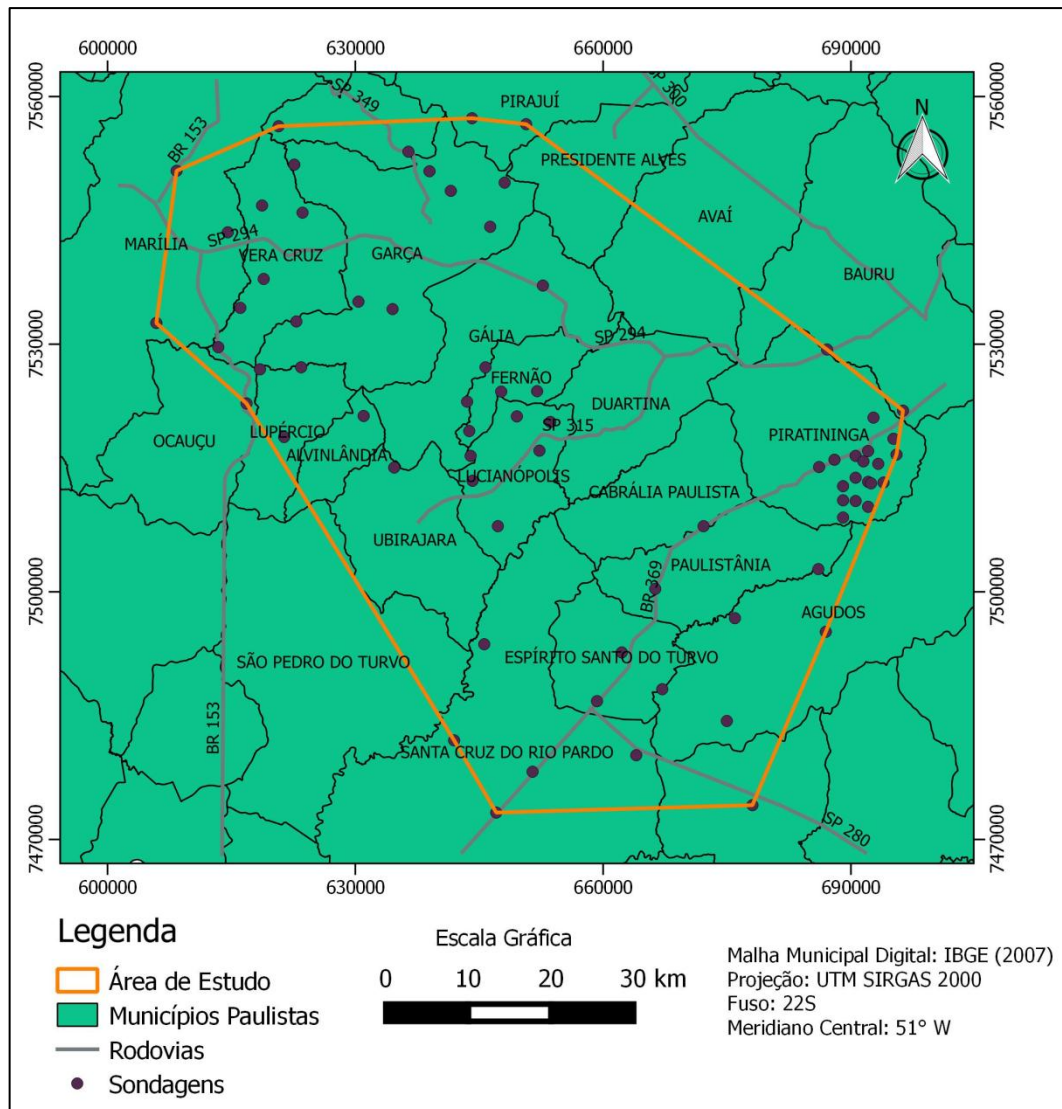
5.2. Métodos

5.2.1. Delimitação da área de estudo

Quando da sua realização, os ensaios realizados pelo IPT tinham como objetivo aprofundar o conhecimento sobre a litoestratigrafia da Bacia Sedimentar do Paraná. Geralmente, essas sondagens eram realizadas ao longo de rodovias devido ao fácil acesso, evitando assim situações indesejáveis como abertura de picadas, terrenos íngremes ou alagados. Muitas vezes, a escolha do local para a realização dos ensaios era baseada no conhecimento prévio de alguma anomalia geológica da área ou visando condições geológicas favoráveis tanto para a prospecção de petróleo e gás quanto para exploração da água subterrânea (FRANCISCO, 2013).

Logo, as SEV's não se apresentam uniformemente distribuídas. Aliado a esse fato, tem-se a quantidade de dados disponíveis como fatores que auxiliaram na delimitação da área de estudo. Tendo em vista que a presente pesquisa visa analisar o comportamento dos basaltos da Formação Serra Geral em subsuperfície, locais em que não foram realizados ensaios foram excluídos da área de estudo, conforme demonstrado na Figura 13.

Figura 13: Localização das SEV's utilizadas na área de estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2.2. Caracterização da área de estudo

Para melhor entendimento da geologia e do comportamento das águas em subsuperfície, buscou-se caracterizar a região enfatizando as formações geológicas presentes e suas características, assim como os principais reservatórios de água subterrânea da região. Para tal, foram utilizados três tipos de fonte de informação, a saber: publicações científicas, relatórios técnicos e documentos cartográficos.

As publicações científicas referem-se a dissertações de mestrado, teses de doutorado, trabalhos publicados em eventos científicos e periódicos nacionais. Os relatórios técnicos

referem-se às publicações de órgãos públicos como ANA e CETESB e instituições internacionais como a Organização dos Estados Americanos (OEA). Os documentos cartográficos foram utilizados como suporte para a confecção dos mapas aqui apresentados, são eles: Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al, 1984) e Mapa de Unidades Hidrogeográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (DAEE et al, 2003).

5.2.3. Elaboração da fundamentação teórica

Adicionalmente, foi elaborada a fundamentação teórica sobre temas específicos e fundamentais para o embasamento teórico do trabalho. Assim como no item anterior, as publicações podem ser divididas em publicações científicas e relatórios técnicos. As publicações científicas referem-se a temas como hidrogeologia, geofísica e vulnerabilidade natural sendo empregadas dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos científicos. Os relatórios técnicos são predominantemente de autoria do IPT sobre dados referentes a ensaios geofísicos realizados na Bacia do Paraná. Cabe ressaltar que para utilização formal destes relatórios criou-se uma parceria na forma de projeto de pesquisa , entre a Seção de Geotecnia, do Centro de Tecnologia de Obras e Infraestrutura – IPT e o Departamento de Geologia Aplicada, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – UNESP (IPT;UNESP, 2013).

5.2.4. Coleta e organização dos dados

Inicialmente, todas as SEV's utilizadas na pesquisa tiveram suas folhas e curvas de campo digitalizadas em planilhas Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007) para preservar as informações e compor um banco de dados. A partir daí, criou-se outra planilha contendo, além das informações cadastrais de cada sondagem, informações obtidas a partir da análise, tais como:

- Cota Topográfica;
- Profundidade do nível d'água;
- Profundidade do topo da Formação Serra Geral;

- Profundidade do topo da Formação Botucatu;
- Espessura da Formação Serra Geral;
- Resistividade dos estratos geoeletricos;
- Profundidade dos estratos geoeletricos.

5.2.5. Geoprocessamento

A partir da interpretação dos dados obtidos nas sondagens, buscou-se analisar o comportamento da Formação Serra Geral em subsuperfície, tendo em vista que a sua presença é fundamental para a proteção do aquífero Guarani. Além dos mapas gerados em ambiente SIG, gerou-se um perfil para melhor visualização da variação de sua espessura.

Para elaboração do mapas (Figura 15 e 16) foi utilizado o *software* QGIS versão 2.8.2 – Wien (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2015). Nele, primeiramente criou-se um arquivo *shapefile* do tipo ponto para todas as sondagens. Além das coordenadas geográficas, o arquivo apresentava como atributos a espessura da camada de basalto e sua resistividade. A partir das SEV's georreferenciadas, os atributos foram interpolados por meio da ferramenta Interpolação, do módulo *Raster*, utilizando-se do método de interpolação Peso pelo inverso da distância. Posteriormente, através da ferramenta Cortador, também do módulo *Raster*, a imagem foi reduzida, deixando de fora locais distantes dos pontos, pois os mesmos poderiam apresentar valores irreais devido à interpolação.

Para criação dos perfis, foi importada para o *software* QGIS versão 2.8.2 – Wien (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2015) uma planilha contendo como atributos Cota Topográfica, Cota do Topo do Basalto e Cota da Formação Botucatu. Semelhantemente a elaboração do mapa de espessura, os três atributos foram interpolados criando-se um arquivo do tipo *raster* para cada um.

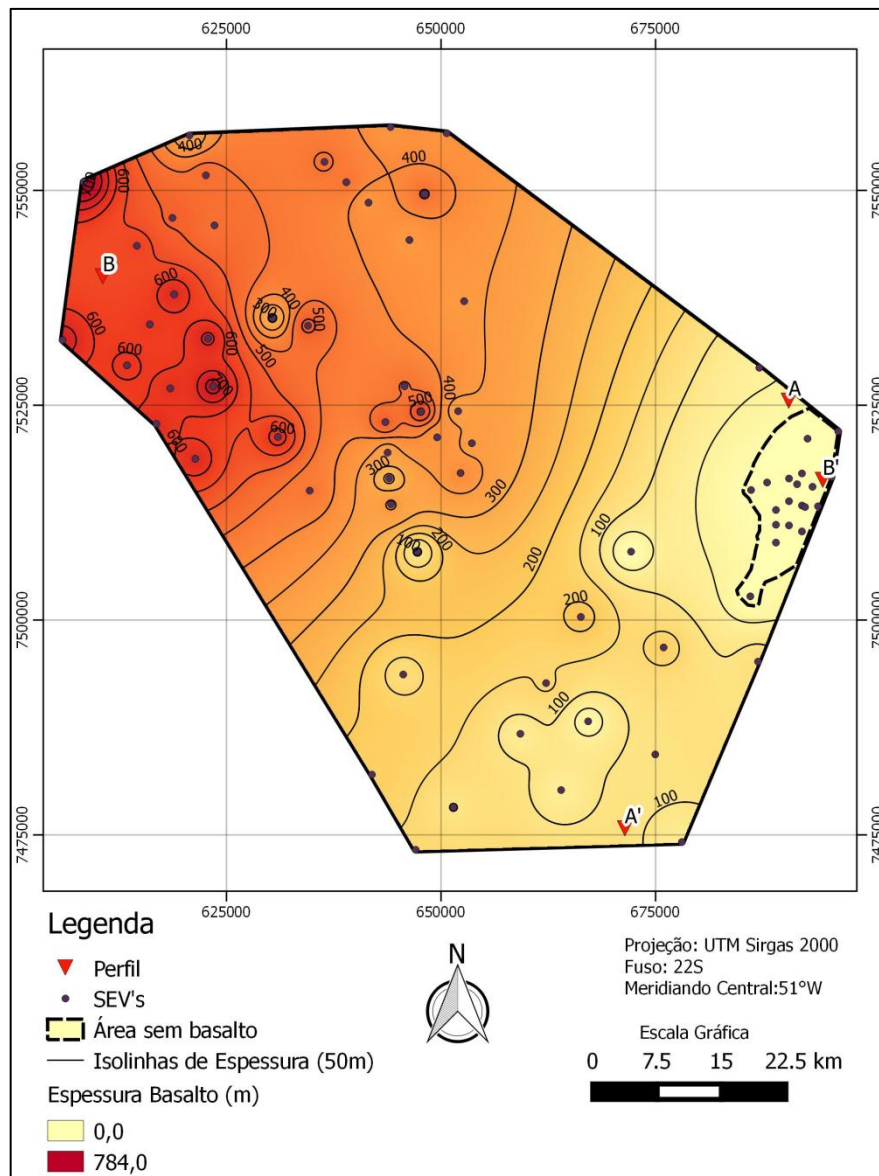
Posteriormente, com auxílio do complemento *Terrain Profile* (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2015), selecionou-se dois pontos a partir dos quais gerou-se uma tabela com os valores de cada atributo. Essa tabela foi exportada para o *software* Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007) e nele foi gerado um gráfico de linhas representando o perfil desejado.

6. RESULTADOS

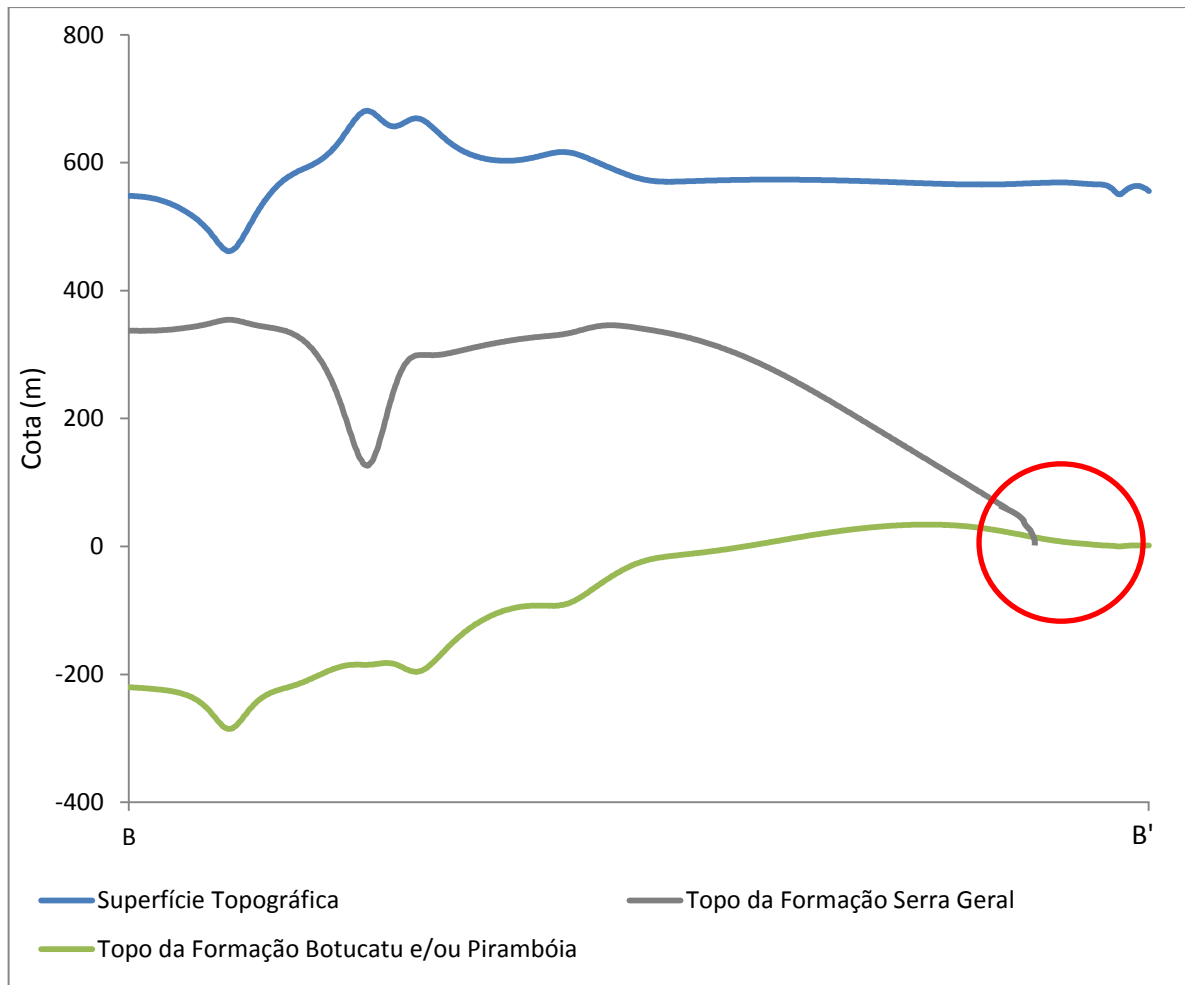
6.1. Espessura e resistividade da Formação Serra Geral

Como pode ser observado na Figura 14, a Formação Serra Geral apresenta grande variação em sua espessura. Na região mais a oeste, ocorrem as áreas onde os basaltos se encontram mais espessos, podendo alcançar 790m, aproximadamente. Tendem a diminuir em direção ao leste, até algumas regiões onde a inexistência da Formação Serra Geral é atestada pelas sondagens. Esses resultados corroboram aqueles encontrados em Santoro; Massoli, (1985) e em Paula e Silva *et al* (2008).

Figura 14: Mapa de espessura da Formação Serra Geral



Fonte: Elaborado pelo Autor

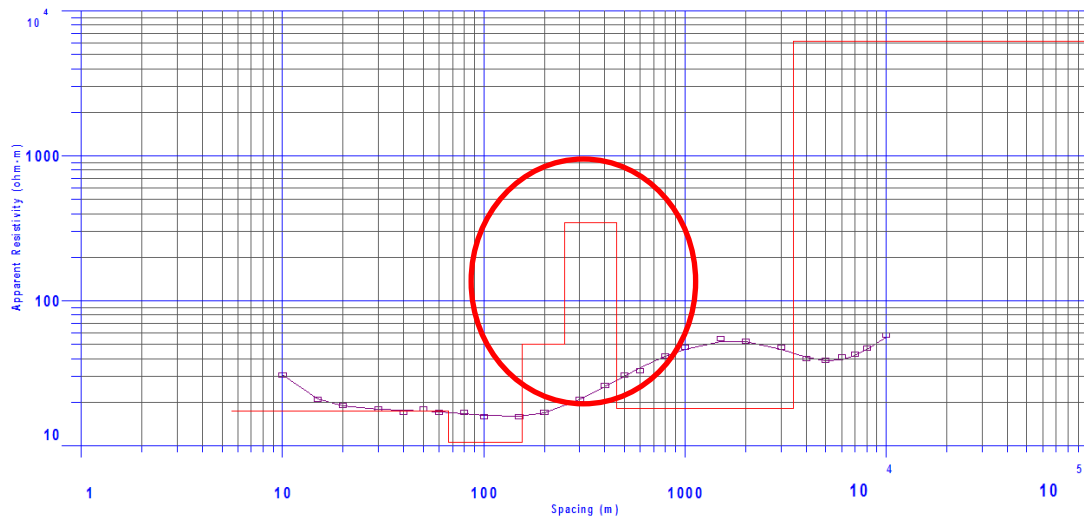
Figura 16: Perfil BB'

Fonte: Elaborado pelo Autor

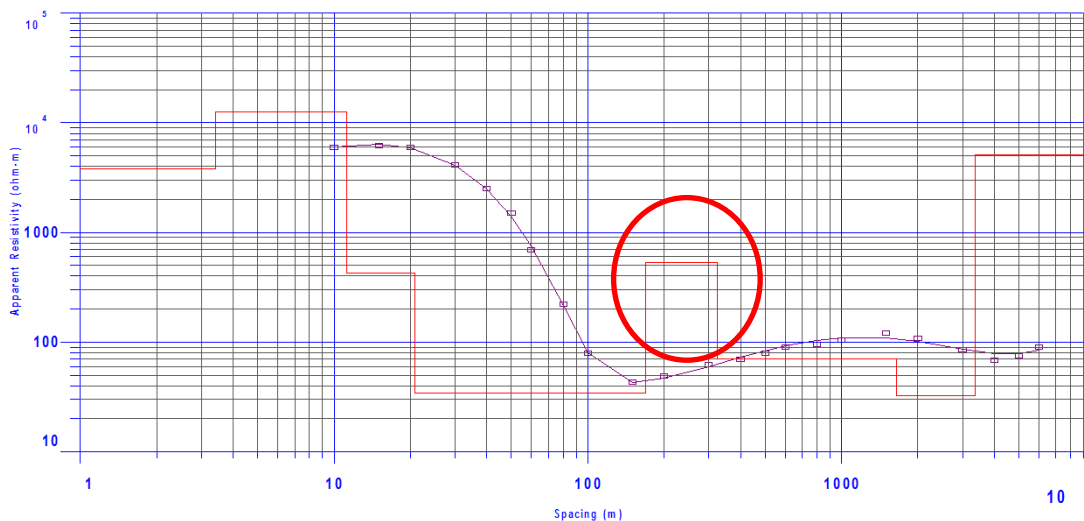
6.2. Resistividade elétrica e estimativa da Condutância Longitudinal (S) da Formação Serra Geral

No decorrer da interpretação dos dados, observou-se que, em mais da metade dos ensaios realizados, a Formação Serra Geral apresentou dois valores distintos de resistividade. Com isso pode-se inferir que, na mesma formação, existem dois pacotes de derrames com características distintas.

A Figura 17 representa a curva de campo de uma das sondagens. O eixo vertical representa os valores da resistividade e o eixo horizontal, o espaçamento $AB/2$. Nela, o círculo vermelho destaca os dois valores distintos para o basalto, evidenciando a presença de derrames diferentes, um superior e outro inferior. A Figura 18 representa a curva de campo de um ensaio realizado onde a formação apresenta somente um valor de resistividade (círculo vermelho) para o derrame.

Figura 17: Basalto com a presença de dois derrames distintos

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 18: Basalto com a presença de apenas um derrame

Fonte: Elaborado pelo Autor

A análise das curvas de campo revelou que, nas sondagens com dois níveis de resistividade para o basalto, o valor encontrado para a camada inferior assemelhava-se aos valores encontrados para a formação nos ensaios em que a mesma apresentava somente um valor de resistividade para a camada. Com isso pode-se deduzir que elas possuem as mesmas características hidrogeológicas. Já a camada superior, apresentava valores superiores a estes. A Tabela 4 traz os valores médios de espessura, resistividade e condutância longitudinal dessas camadas.

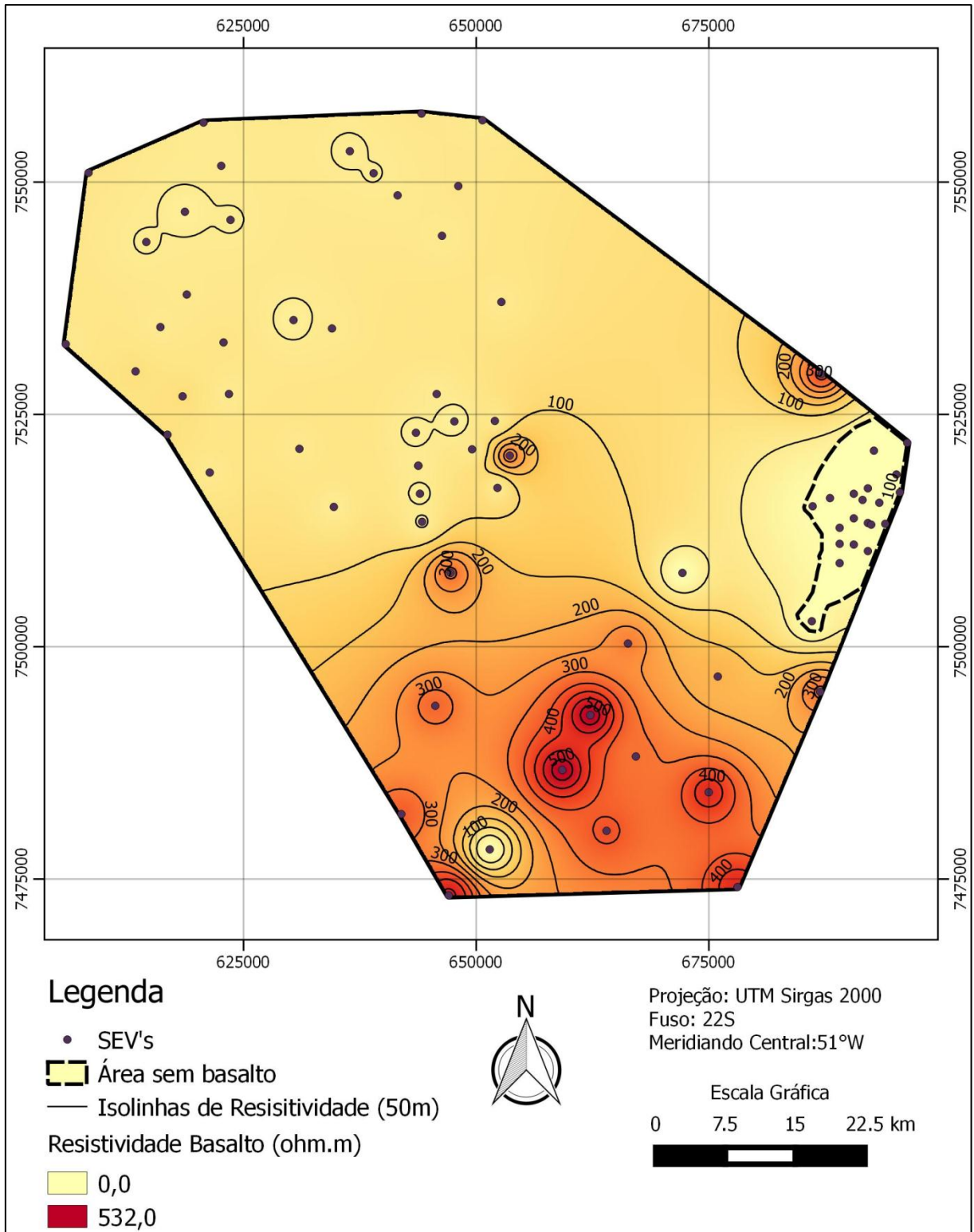
Tabela 4: Valores médios de espessura, resistividade e condutância longitudinal

		Formação com 2 níveis		Formação com 1 nível
		Camada Superior	Camada inferior	
Resistividade (ohm.m)	Mínimo	27,9	157,3	182,3
	Médio	53,3	288,5	355,3
	Máximo	80,3	433,8	531,3
Espessura (m)	Mínimo	59	140	22
	Médio	190	290	130
	Máximo	477	590	330
Condutância Longitudinal (siemens)	Mínimo	0,81	0,36	0,07
	Médio	3,77	1,11	0,40
	Máximo	13,81	3,51	1,21

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 19 é um mapa de resistividade da Formação Serra Geral obtido a partir das sondagens realizadas. Nas áreas onde foram observados derrames com duas camadas, para elaboração do mapa, foram adotados os valores da camada superior. No mapa pode-se perceber que os maiores valores de resistividade encontram-se a sul da área de estudo, diminuindo em direção noroeste. Baixos valores de resistividade indicam que há pouca água no interior da camada. Por se tratar de uma camada de rocha magmática isso significa que a camada apresenta-se conservada, com baixo grau de faturamento e com reduzida quantidade de água em seus poros.

Figura 19: Mapa de resistividade da Formação Serra Geral



A partir dos valores de Condutância Longitudinal, criou-se uma classificação com quatro categorias de vulnerabilidade: extrema, alta, média e baixa. A Tabela 5 traz a faixa de valores e as características de cada faixa.

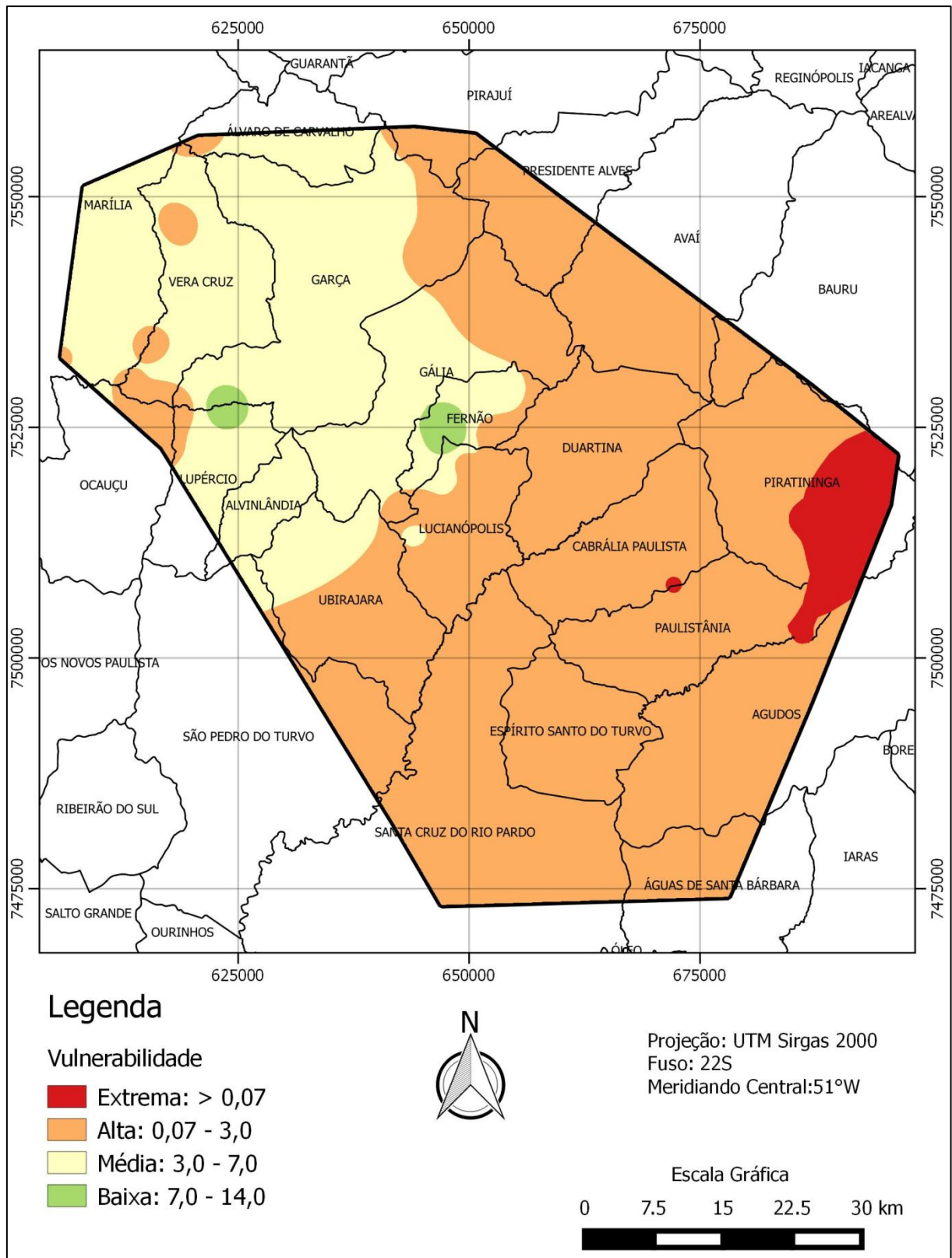
Tabela 5: Classes da Vulnerabilidade

Classe	Intervalo (siemens)	Características
Extrema	de 0 a 0,07	Ausência de basalto
Alta	de 0,071 a 3,00	Basalto com elevada permeabilidade e pouco espesso.
Média	de 3,01 a 6,00	Basalto com baixa permeabilidade, ou muito espesso.
Baixa	de 6,01 a 14,0	Basalto com baixa permeabilidade e muito espesso.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Após o estabelecimento das classes de vulnerabilidade, elaborou-se um mapa (Figura 20) a partir dos valores de condutância longitudinal, utilizando-se dos mesmos procedimentos que foram utilizados para a confecção do mapa de espessura (Figura 14). Ocupando 2,5% da área, as regiões classificadas como vulnerabilidade extrema encontram-se a leste, na região conhecida como Domo de Piratininga. Nela o basalto é inexistente, portanto o SAG encontra-se livre e exposto a fontes de contaminação antrópica. As áreas que foram classificadas com alta vulnerabilidade abrangem maior parte da área de estudo (64%), e caracterizam-se por um basalto pouco espesso, poroso e com elevado número de fraturas. Regiões que apresentaram ou baixa resistividade ou a camada de basalto apresentava-se muito espessa, foram classificadas com uma vulnerabilidade média, ocupando 32,5% da área. Por fim, foram classificadas com vulnerabilidade baixa as áreas onde o basalto encontrava-se muito espesso e com resistividade muito baixa perfazendo uma área de aproximadamente 1%.

Figura 20: Mapa de vulnerabilidade da Formação Serra Geral



Fonte: Elaborado pelo Autor

7. CONCLUSÃO

A necessidade de preservar um aquífero como o Guarani é indiscutível. Devido a sua abrangência, volume armazenado e a qualidade de suas águas, tornou-se uma reserva estratégica de recursos hídricos. Aliado a isto, tem-se o crescimento econômico e populacional de regiões que localizam-se sobre o mesmo, como a região de estudo.

A estimativa da vulnerabilidade natural e, conseqüentemente, a delimitação de áreas seguindo uma classificação é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. Contudo, os dados utilizados nas principais metodologias de análise da vulnerabilidade nem sempre estão disponíveis. Neste cenário, a utilização de ensaios geofísicos, baseados no método da eletrorresistividade, mostrou-se um alternativa mais rápida, barata e menos invasiva para a obtenção destes dados.

Na área estudada, estes ensaios serviram de base para o estudo da Formação Serra Geral que recobre o SAG por quase toda a região. Pôde-se observar o espessamento da camada confinante em direção a oeste. Nas regiões mais a leste, próximo ao município de Bauru, foi constatada a inexistência desta camada, entretanto não foi possível estabelecer que formação aflora na região, em função da resolução do método geofísico empregado. Segundo DAEE *et al* (1984), afloram nesta área sedimentos da Formação Pirambóia (Grupo São Bento) e Formação Corumbataí (Grupo Passa Dois).

Além da espessura, foi analisada a resistividade da Formação Serra Geral. Em algumas regiões, observou-se a existência de dois valores distintos de resistividade para a Formação Serra Geral, desse modo conclui-se que nessas regiões há duas camadas de basalto com características distintas.

Utilizando-se da razão entre a espessura e a resistividade, também conhecida como Condutância Longitudinal, elaborou-se um mapa de vulnerabilidade natural da área.

A estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos confinados não é uma prática usual, pois se acredita que o fato de o mesmo encontrar-se recoberto por uma camada confinante é o suficiente para preservá-lo. Entretanto, tão importante quanto a presença desta camada são suas características que pouco são estudadas. Pode-se observar, que nas regiões com a presença de duas camadas de derrames basálticos, a camada superior apresentava valores de resistividade menores, ou seja, a presença de água em seus poros e fraturas é maior que em outras regiões.

Logo conclui-se que o estudo da camada confinante, sobrejacente ao aquífero, é fundamental para sua conservação. O simples fato dessa camada existir não é suficiente para

se determinar se o aquífero está protegido ou não. Estudos detalhados sobre seu grau de conservação devem ser levados em conta, além de se considerar as camadas sobrepostas à camada confinante.

Neste estudo foram considerados somente a espessura da camada confinante e sua resistividade. Aconselha-se estudos mais aprofundados sobre a Formação Serra Geral, e Grupo Bauru que considerem a direção das fraturas e o fluxo da água subterrâneas. Outro fator importante são as áreas onde o basalto não ocorre, nestes lugares o aquífero encontra-se muito mais vulnerável. Além do mais, é aconselhada a realização de SEV's onde a densidade dos ensaios é baixa. Com isso os resultados seriam mais precisos e representariam melhor a realidade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Atlas Brasil - Abastecimento urbano de água. Volume 1 e 2. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2010.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. Drastic: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential hydrogeologic setting. Environmental Protection Agency (EPA), Washington (DC), Report 600/2-87-035.1987.

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1964. 99 p

ALMEIDA, F. F. M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozoico no Brasil. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 16, n. 4, p.325-349. dez. 1986.

ASSINE, M.L.; PIRANHA, J.M.; CARNEIRO, C.D.R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: MANTESSO-NETO et al. Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: BECA, 2004. p. 77-92.

BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; CAVANI, A. C. M. Avaliação do perigo de contaminação do sistema Aquífero Guarani em sua área de afloramento do Estado de São Paulo decorrente das atividades agrícolas. Revista Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 1-14, 2011.

BÓS, S. M.; THOMÉ, A. Métodos para avaliar vulnerabilidade das águas subterrâneas. Porto Alegre: POA Comunicação, 2012.82 p.

BRAGA, A. C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. 2006 a. 126 p. Tese (Livre-Docência na Disciplina Métodos Geométricos Aplicados à Hidrogeologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BRAGA, A. C. O. Métodos geométricos aplicados nos estudos de captação e de contaminação de águas subterrâneas. Material didático. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2007. 80 p

BRAGA, A. C. O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 61-68, 2008.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; FILHO, E. F. R. Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba, 2004.

CAETANO-CHANG, M. R. A Formação Pirambóia no centro-leste do Estado de São Paulo. 1997. 196 p. Tese (Livre Docência em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

CAETANO-CHANG, M. R.; WU, F. T. Diagênese de arenitos da Formação Pirambóia no centro-leste paulista. Revista Geociências, São Paulo, v. 22, n. especial, p. 33-39, 2003.

CAMPONAGARA, I. Vulnerabilidade natural no sistema aquífero guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR e Artigas, UY. 2006. 110f. Dissertação (Mestrado em Geografia e Geociências) - Centro De Ciências naturais e Exatas. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CAMPOS, A. F. et al. Correlação de dados sísmicos multiescala e integração com arcabouço tectônico regional: exemplo da área do Domo de Piratininga, SP. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 38, n. 2, jun. 2008. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0375-75362008000400003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 31 jul. 2015.

CARLOS, I. M. Estimativa de parâmetros hidrogeológicos como subsídio para modelagem de aquífero integrada a estudos geofísicos na região de Bebedouro – SP. 2010. 203f. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CARLOS, I. M. et al. Métodos geofísicos integrados para a caracterização hidrogeológica dos aquíferos da microbacia Andes, Bebedouro, em São Paulo. Revista Brasileira de Geociência, São Paulo, v. 42, n. 3, p. 597-614, 2012.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO MÉDIO PARANAPANEMA– CBH/MP. Relatório de situação dos recursos hídricos 2013. Disponível em: <<http://cbhmp.org/publicacoes/relatorio-de-situacao.html>>. Acesso em: 25 mai. 2015.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-BATALHA – CBH/TB. Relatório de situação dos recursos hídricos 2013. Disponível em: <<http://www.comitetb.sp.gov.br/index.php?tab=1&acao=com17>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2010-2012. São Paulo, 2012. Série Relatórios. 222 p.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. Estudo de águas subterrâneas - regiões administrativas 7, 8 e 9 - Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba. São Paulo: DAEE, 1976. v. 1 e v. 2

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO – IGC; GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa das unidades hidrográficas de gerenciamento de recursos hídricos do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. São Paulo: DAEE, IGC, Governo do Estado de São Paulo, 2003

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP; SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – SMA. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:250.000. São Paulo: DAEE, Unesp, SMA, 1984.

ELIS, V. R. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. 1998. 264f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. Ed. Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 2006. 306 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID-UFPE, 2008. 812 p.

FERNANDES, L. A. A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema: os grupos Bauru e Caiuá. 1992. 129 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto Geológico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A. Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil). 1998. 188 p. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto Geológico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FOSTER, S.; HIRATA, R. Contaminação das águas subterrâneas. Organização Mundial de Saúde, Organização Panamericana de Saúde, Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais. Lima, 1987.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Edição brasileira: SERVIMAR – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, 2006. Banco Mundial. 104 p.

FRANCISCO, R F. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru, na região Centro-Sul do Estado de São Paulo. 2013. 116f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

GALLAS, J. D. F. Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. 2000. 174f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; FERNANDES, L.A.; DONNATI, L.M. Paleofluxo sedimentar do sistema deposicional Pirambóia nos estados de São Paulo e Paraná, Bacia do Paraná: estudo baseado em análise estatística de dados azimutais. Revista Brasileira de Geociências, v.34, n. 2, p. 282-292, 2004.

GOMES, R. L. Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da Bacia do Paraná. 2001. 295f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

HENRIET, J. P. Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. Geophysical Prospecting, n. 24, p. 344-353. 1975.

HIRATA, R. C. A. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudos de casos no Estado de São Paulo. 1994. 195 p. Dissertação (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 43-50, mar. 2001. Disponível em: <<http://rbg.sbgeo.org.br/index.php/rbg/article/viewFile/A-1149/609>>. Acesso em: 05 mar 2015

HIRATA, R. C. A.; SUHOGUSOFF, A. V. A proteção dos recursos hídricos subterrâneos no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 13. 2004. Cuiabá. Anais... São Paulo: ABAS, 2004, p. 15.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Manual Técnico de Pedologia. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2007. 316 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Malhas Digitais. 2007. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 18 ago. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Sondagens elétricas verticais. São Paulo: IPT. Folhas de campo e curvas originais, bloco 45. 1981.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUISTA FILHO” – UNESP. Banco de dados geofísicos da bacia do Paraná. Rio Claro: IPT, Unesp. Projeto de pesquisa. 9 p. 2013

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. Cadernos de educação ambiental: as águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico. São Paulo, 2009. 104 p.

LASTORIA, G. Hidrogeologia da formação Serra Geral no Estado do Mato Grosso do Sul. 2002. 133f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

MICROSOFT CORPORATION. Microsoft Office Excel. Software. 2007.

MEAULO, F. A. O mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos: o exemplo de Araraquara-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 13. 2004. Cuiabá. Anais... São Paulo: ABAS, 2004, p. 21.

MEZZARILA, S.; AZEVEDO, A. A. B.; TOMINAGA, L. K.; PRESSINOTTI, M. M. N.; MASSOLI, M. Léxico estratigráfico do Estado de São Paulo. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, v. 5, n. 1, p. 1-161. 1981.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. 1997. 2v. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, A. L.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. Boletim Geociências Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, mai./nov. 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido a ser protegido. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 40 p.

MONTEIRO, R. C. Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do Sistema Aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil. 2003. 212f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

ORELLANA, E. Prospección geoelectrica en corriente continua. Madrid: Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 1972. 523 p.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS - OEA. Aquífero Guarani: programa estratégico de ação = Aquífero Guarani: programa estratégico de acción. Edição bilíngue. Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai, 2009. 424 p.

OSÓRIO, Q. S. Vulnerabilidade natural de aquíferos e potencial de poluição das águas subterrâneas. 2004. 152p. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PAULA e SILVA, F. Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. 2003. 166f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

PAULA e SILVA, F.; CAVAGUTI, N. Gestão dos recursos hídricos subterrâneos na cidade de Bauru – SP, face as características hidrogeológicas especiais da região. In: CONGRESSO BRASIELIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7., 1992, São Paulo. Anais...São Paulo, 1992, p. 6

PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP. Revista Geociências, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 83-99, 1994

PAULA E SILVA F., KIANG, C. H. e CAETANO-CHANG, M. R. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. Revista Águas Subterrâneas, v. 19, n. 2, p. 77-88, mar. 2005.

PAULA E SILVA F., KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R.; SINELLI, O. Arcabouço geológico e hidrofacies do Sistema Aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP). Revista Brasileira de Geociências, v. 38, n. 1. P. 56-67, mar. 2008.

PERINOTTO, J. A. de J.; ETCHEBEHERE, M. L. de C.; SIMÕES, L. S. A.; ZANARDO, A. Diques clásticos na Formação Corumbataí (P) no nordeste da Bacia do Paraná, SP: análise sistemática e significações estratigráficas, sedimentológicas e tectônicas. Revista Geociências, Rio Claro, v. 27, n. 4, p. 469–491, 2008.

PETRI, S.; FÚLFARO, V. J. Geologia do Brasil. São Paulo: Universidade de São Paulo, 631 p., 1983.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 2015.

REBOUÇAS, A. C. Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná – análise de pré-viabilidade. 1976. 152f. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

RICCOMINI, C. Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas. 1995. 108f. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ROCHA, G. A. O grande manancial do Cone Sul. Estudos Avançados, São Paulo, v. 11, n. 30, p. 191-212, ago. 1997. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141997000200013&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 29 Abr 2015.

ROLIM, G. S. et al. Classificação climática de Köppen e de Hornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007

ROSS, J. L. S. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. FFLCH-USP, 1997.

SANTORO, J.; MASSOLI, M. Mapa de contorno estrutural do topo do basalto subjacente ao Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Revista Instituto Geológico, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 39-44, jan./dez. 1985.

SCHNEIDER, R.L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A..A.. (1974)- Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Anais... Porto Alegre, SBG, v.1, p. 41-65.

SHIKLOMANOV, I. A. World water resources – a new appraisal and assessment for the 51st century. Paris: International Hydrological Programme/ ONU, 1998. 37p.

SOARES, P.C. Divisão Estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 5, p. 229-251, 1975.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.10, p. 177-185, 1980.

SQUISATO, E. A Formação Serra Geral na porção centro-norte do Estado de São Paulo. 2008. 61f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

SQUISATO, E.; NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B.; MARQUES, L. S.; ROCHA JUNIOR, E. R. V.; OLIVEIRA, M. A. F. Litogeoquímica e aspectos petrogenéticos dos basaltos da Província Magmática do Paraná na porção centro-norte do Estado de São Paulo. Revista Geociências, Rio Claro, v. 28, n. 1, p. 27-41, 2009.

SUGUIO, K.; FÚLFARO, V. J.; AMARAL, G.; GUIDORZI, L. A. Comportamentos estratigráficos e estrutural da Formação Bauru nas regiões administrativas 7 (Bauru), 8 (São José do Rio Preto) e 9 (Araçatuba) no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL, 1., 1977, São Paulo. Atas... São Paulo: SBG, 1977. p. 231-247.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, C. T. F.; SILVEIRA, J. G. P.; ALMEIDA JÚNIOR, F. J. B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. Revista da Escola de Minas, v. 62, n. 2, p. 227-236, 10 p., jun. 2009

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Org.) Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Universidade, 2000. p. 335-372.

WU, Fu-Tai; CAETANO-CHANG, Maria Rita. Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo. Revista Instituto Geológico, São Paulo, v. 13, n. 1, jun. 1992 . Disponível em < http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-929X1992000100004&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 01 jul. 2015. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19920004>

ZANARDO, A. Pesquisa Geológica e de Matérias-primas cerâmicas do centro nordeste do estado de São Paulo e vizinhanças. 2003. 283 f. Livre Docência – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

ZANETTI, N. Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP. 2012. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.