

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE ZONA DE RECARGA DO AQUIFERO
TUBARÃO A PARTIR DE ANÁLISE DE PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE
ELÉTRICA DO SOLO

Giulia de Vincenzo Rafael

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Coorientadora: Msc. Fernanda Teles Gomes Rosa

Rio Claro (SP)

2022

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

GIULIA DE VINCENZO RAFAEL

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE ZONA DE RECARGA
DO AQUÍFERO TUBARÃO A PARTIR DE ANÁLISE DE
PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso 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 Geóloga.

Rio Claro - SP

2022

R136c

Rafael, Giulia de Vincenzo

Caracterização hidrodinâmica de zona de recarga do aquífero Tubarão a partir de análise de permeabilidade e resistividade elétrica do solo / Giulia de Vincenzo Rafael. -- Rio Claro, 2022

48 p. : fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: César Augusto Moreira

Coorientadora: Fernanda Teles Gomes Rosa

1. Área úmida. 2. Geofísica. 3. Tomografia elétrica. 4. Condutividade hidráulica. 5. Caracterização hidrodinâmica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

GIULIA DE VINCENZO RAFAEL

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE ZONA DE RECARGA
DO AQUÍFERO TUBARÃO A PARTIR DE ANÁLISE DE
PERMEABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso 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 Geóloga.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Beatriz Guzzo Duz

Matheus Felipe Stenfoca Casagrande

Rio Claro, 07 de março de 2022.



Assinatura da aluna



Assinatura do orientador



Assinatura da coorientadora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família, especialmente ao meus pais, Daniela e Eduardo, pelo amor, esforço e suporte ao longo da faculdade e da vida.

Ao Prof. Dr. César Augusto Moreira e a Msc. Fernanda Teles Gomes Rosa, pela orientação e paciência na elaboração deste trabalho. Inclusive pelo momento que passamos da pandemia de Covid-19, e todas as dificuldades que traz à tona, e mesmo assim não terem desistido e sim me incentivado.

A turma de Geologia 2016 “Cabacitos” pela amizade e companhia que proporcionaram ao longo da graduação. Em especial ao grupo “Filhas da pulta” que estiveram comigo desde o início e permanecerão ao longo da vida.

A casa “Las Maritacas”, que trouxe a melhor dupla dinâmica que poderia ser criada, a “pequeninha raivosa” que tanto compartilhei momentos inesquecíveis.

As repúblicas Gleice e Taco + agregados que definem e transbordam o significado de amizade. Vocês são a base a base de tudo, não conseguiria finalizar esse trabalho sem todo o suporte e confiança que proporcionam.

Por fim, a todos que sempre confiaram e acreditaram em mim, mostrando e lembrando que sou um ser capaz do imaginável e inimaginável, meu muito obrigada.

“Ninguém pode entrar duas vezes no mesmo rio, pois quando nele se entra novamente, não se encontra as mesmas águas, e o próprio ser já se modificou ...” (Heráclito de Éfeso)

RESUMO

As áreas úmidas são de suma importância para a manutenção do ambiente pela função de recarga natural de aquíferos por infiltração superficial. São grandes armazenadoras de água, com estimativa de abrangência cerca de 20% do território nacional, em contrapartida infelizmente vem sendo destruídas em virtude de mudanças do uso e ocupação do solo. Neste trabalho, a fim de compreender como essa recarga ocorre localmente numa zona do Aquífero Tubarão, foram associados dois métodos não invasivos. O primeiro método de aquisição de dados é indireto e envolve o método geofísico da Eletrorresistividade, para mapeamento dos caminhos de fluxo em subsuperfície. O segundo método é direto e envolve a determinação da permeabilidade do solo, que gera índices de condutividade hidráulica, para entendimento da recarga superficial para o solo. Essa combinação de ensaios, que gera dados rasos e profundos nos leva a um melhor entendimento da relação superfície-aquífero, e evidencia a zona de recarga.

Palavras-chave: área úmida, condutividade hidráulica, tomografia elétrica

ABSTRACT

The wetlands are of utmost importance for the maintenance of the environment, because they are a natural components of aquifer recharge through surface infiltration. These areas are great water storages and are estimated to comprise about 20% of national territory. In contrast, they have unfortunately been destructed for land use and occupation. In order to understand how this recharge occurs locally in an area of the Tubarão Aquifer, this work associates two non-invasive methods. The first one is an indirect data acquisition method and involves electrical acquisition lines, for the mapping of subsurface flux paths. The second method is direct and involves the determination of the soil's permeability, which generates hydraulic conductivity indexes, for understanding surface recharge to the soil. This combination brings us to a better comprehension of the surface-aquifer dynamics, environmental sensibility and the relevance of wetlands to an adequate land use planning.

Key-words: wetland, hydraulic conductivity, electrical tomography

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Localização da área de estudo e rota a partir da UNESP	13
Figura 2: Localização da área úmida, vista de cima.....	14
Figura 3: Mapa geológico simplificado das Supersequências da bacia do Paraná no Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai	17
Figura 4: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro/Limeira/Piracicaba (SP)	18
Figura 5: Localização dos aquíferos paulistas. Do mais antigo para o mais jovem: pré-Cambriano (P€), pré-Cambriano cárstico (P€c), Furnas (Df), Tubarão (CPt), Guarani (TRg), Serra Geral (Ksg), Serra Geral Diabásio (Ksgd), Bauru (Kb), São Paulo (Tsp), Taubaté (Tt), Litorâneo (Ql). Em vermelho a localização da área.	20
Figura 6: Fluxo de corrente num condutor linear de comprimento L, resistência R e área de seção A	23
Figura 7: Propagação do campo elétrico em meio isotrópico e tridimensional, por associação de quatro eletrodos.....	23
Figura 8: Disposição dos eletrodos no arranjo Schlumberger	25
Figura 9: O ciclo da água	26
Figura 10: Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade da rocha..	29
Figura 11: Tempo de circulação da água subterrânea – recarga e descarga	30
Figura 12: Fotografia do aparelho Terrameter LS	32
Figura 13: Malha de aquisição de dados geoeletricos	32
Figura 14: Malha de coleta de permeabilidade.....	33
Figura 15: Fotografia do permeâmetro fixado ao solo e abastecido com água	34
Figura 16: Modelo de inversão 2D para as linhas 1 a 5	37
Figura 17: Modelo de inversão 2D para as linhas 6 a 10	38
Figura 18: Modelo de inversão 2D para as linhas 11 a 15	39
Figura 19: Mapa de condutividade hidráulica sobreposto a imagem de satélite da área de estudo e linhas de aquisição geofísica.....	41
Figura 20: Correlação entre zonas de alta condutividade hidráulica e alta resistividade, indicando canal preferencial vertical de recarga	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos	12
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	13
2.1. Localização	13
2.2. Áreas Úmidas.....	14
2.3. Geologia Regional.....	16
2.3.1. Bacia do Paraná	16
2.3.2. Contexto geológico da bacia do paraná no Estado de São Paulo	18
2.4. Aquífero Tubarão	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1. Conceitos de Geofísica	21
3.1.1. Propriedades Elétricas de solos e rochas.....	21
3.1.2. Método de Eletorresistividade	22
3.1.3. Arranjo Schlumberger.....	24
3.2. Conceitos de hidrogeologia.....	26
3.2.1. Parâmetros Hidrogeológicos	27
3.2.2. Aquífero	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Levantamento Bibliográfico	31
4.2. Aquisição de Dados	31
4.2.1. Tomografia Elétrica.....	31
4.2.2. Permeabilidade.....	33
4.3. Processamento dos dados.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1. Eletorresistividade.....	36
5.2. Condutividade Hidráulica	40
6. CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

As áreas úmidas (AU) são definidas como lugares episodicamente ou periodicamente inundados devido o transbordamento lateral de rios, lagos e precipitação direta (Junk et al., 1989). De maneira que a biota responde ao ambiente físico-químico com suas adaptações necessárias, sendo elas morfológicas, anatômicas e fisiológicas gerando características próprias de cada comunidade (PIEPADE, 2012). Essas áreas recobrem cerca de 20% do Território Brasileiro, as quais tem tamanho e formas muito diversas e amplamente distribuídas (Da Cunha et al., 2015).

As áreas úmidas, além de serem importantes ecossistemas, são áreas que promovem a infiltração das águas superficiais, ou seja, áreas de recarga de aquíferos (HAQUE et al., 2018). No Brasil ainda não são vistas como potenciais recursos hídricos disponíveis nas bacias hidrográficas (Da Cunha et al., 2015), por isso é uma temática pouco explorada na literatura em ambientes tropicais. Segundo Rosolen et al. (2019), é essencial destacar a importância das áreas úmidas, para que a conservação seja promovida pois são um ecossistema frágil e que contribuem significativamente para a biodiversidade ao ter fauna e flora endêmicas.

São áreas que demandam uma atenção, pois vem sendo destruídas pelo aumento da densidade populacional nas diferentes regiões do país. Sendo os principais mecanismos de degradação e perda de AU: (1) drenagem pela agricultura e pecuária; (2) construção de áreas habitacionais, de infraestrutura urbana e de uso industrial; (3) poluição por esgotos e resíduos domésticos, agrícolas, industriais e de mineração (Da Cunha et al., 2015). Nesse sentido, caracterizar a hidrodinâmica de uma zona de recarga de aquífero constitui um desafio para o desenvolvimento sustentável.

Segundo Da Cunha (2015) é sabido que o levantamento de dados sobre AUs no Brasil sofre dois problemas fundamentais: a falta de uma definição das AUs e do seu delineamento que corresponda à condição ecológica específica do país; e uma classificação nacional das AUs que leve em consideração as condições hidrológicas.

Diante da importância de uma AU, esta pesquisa visa avaliar o comportamento hidrodinâmico de uma zona de recarga do aquífero Tubarão na região de Araras (SP),

por meio de combinação de ensaios de permeabilidade no solo e levantamento geofísico pelo método da Eletrorresistividade.

Os ensaios de permeabilidade refletem a facilidade que um líquido tem para circular em um determinado material, e partir dele calculando a condutividade hidráulica que traz a informação de como está ocorrendo a infiltração superficial. O método indireto de tomografia busca determinar o parâmetro físico de resistividade elétrica no ambiente geológico. A junção destes métodos, é possível analisar e entender como a recarga superficial e subsuperficial ocorre nessa área.

1.1. Objetivos

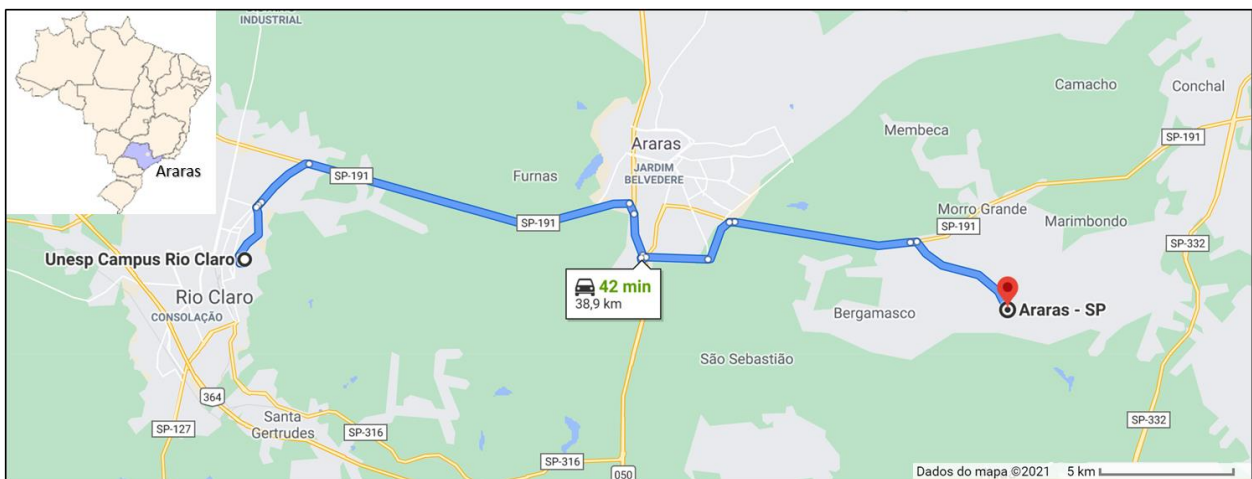
Compreender e caracterizar a dinâmica de uma área úmida como zona de recarga de aquífero por meio de valores de condutividade hidráulica e levantamento geofísico por Eletrorresistividade.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização

A área úmida deste estudo está localizada no interior da cidade de Araras, Estado de São Paulo. O local é de fácil acesso com carro e se dá saindo de Rio Claro seguindo a Estrada SP-191, rumo Araras e Conchal (Figura 1).

Figura 1: Localização da área de estudo e rota a partir da UNESP



Fonte: Google Maps (2021), modificada pelo autor

Situada no contexto geológico da Bacia do Paraná, precisamente na porção da Formação Tatuí e sobre o Aquífero Tubarão. A área possui um perímetro de 770 metros e 45 m² aproximadamente (Figura 2).

De acordo com o mapa pedológico do estado de São Paulo, os solos nas proximidades da área de estudo são classificados como latossolos vermelhos e vermelho-amarelos, argissolos vermelho-amarelos (ROSSI, 2017). Inserida no contexto da Província Geomorfológica da Depressão Periférica Paulista, segundo Ab' Saber (1969), o relevo é caracterizado por um topografia lisa e de morros, todos sustentados por rochas sedimentares da Bacia do Paraná.

Figura 2: Localização da área úmida, vista de cima



Fonte: Google Earth Pro (2021), modificada pelo autor

2.2. Áreas Úmidas

As áreas úmidas são definidas por Junk et al. (1989) como aquelas episodicamente ou periodicamente inundadas pelo transbordamento lateral de rios ou lagos e/ou pela precipitação direta ou pelo afloramento do lençã freático, de forma que a biota responde ao ambiente físico-químico com adaptações morfológicas, anatômicas, fisiológicas e etológicas, gerando estruturas específicas e características dessas comunidades.

Mais recentemente, em um consórcio criado em 2012 por cientistas de alto nível sob liderança do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Áreas Úmidas (INCT-INAU), foi definido “Áreas Úmidas (AUs) são ecossistemas na interface entre ambiental terrestres e aquáticos, continentais ou costeiros, naturais ou artificiais, permanentemente ou periodicamente inundados por águas rasas ou com solos encharcados, doces, salobres ou salgadas, com comunidades de plantas e animais adaptadas à sua dinâmica hídrica” (JUNK, 2015).

Este mesmo consórcio atualizou outra importante definição:

“Recursos Hídricos abrangem a água de chuva e todos os corpos de água, naturais e artificiais, superficiais e subterrâneos, continentais, costeiros e marinhos, de água doce, salobra e salgada, parados (lagos e água represadas) e correntes (rios - intermitentes, efêmeros ou perenes – e seus afluentes, hidrovias e canais artificiais), e todos os tipos de áreas úmidas, permanentes e temporárias”.

Assim com essa nova atribuição de AU como pertencendo aos recursos hídricos, valoriza os múltiplos benefícios deste ecossistema para o ser humano. Incorporando a percepção do real papel das áreas úmidas no ciclo hidrológico, além de serem recursos hídricos de suma importância econômica, social e ecológica (JUNK, 2015).

É estimado entre 8,3 e 10,2 milhões de km² da superfície da terrestre constituído por áreas úmidas, sendo 30% em regiões tropicais. Mais de 20% do território brasileiro pode ser classificado como áreas úmidas, em sua grande maioria correspondendo a florestas. Na Bacia Amazônica as AUs correspondem a 30% do total, e no Pantanal cobre 85% da área. Atingem todos os biomas nacionais, chegando a cobrir centenas de milhares de quilômetros quadrados, podendo ser divididas nas seguintes categorias:

- Áreas alagáveis ao longo de grandes rios de diferente qualidade de água;
- Baixios ao longo de igarapés de terra firme;
- Áreas alagáveis nos interflúvios (campos, campinas e campinaranas alagáveis, campos úmidos, veredas, campos de murunduns, brejos, florestas paludosas;
- Áreas úmidas do estuário (mangues, banhados e lagoas costeiras).

(MITSCH *et al.*, 2015; JUNK *et al.*, 2010a; JUNK *et al.*, 2010b).

As áreas úmidas promovem serviços ambientais importantes, destacando: estocagem e limpeza de água, recarga do lençol freático, regulação do clima local,

manutenção da biodiversidade, regulação dos ciclos biogeoquímicos, estocagem de carbono, e habitat para inúmeras espécies, endêmicas ou não. Além de ser fonte de subsistência para parte da população: pesca, agricultura, produtos madeireiros e não-madeireiros, pecuária extensiva (JUNK et al., 2010 a, b).

São consideradas fundamentais para o processo de estabilidade ambiental e manutenção da diversidade, uma vez que se encontram em relevos planos ou abaciados e apresentam frequentemente elevados níveis de saturação hídrica. Essa última, favorece a capacidade de fixação de carbono, resultando uma alta capacidade de retenção de água e íons no solo, condição que aumenta e estimula a filtragem das águas e regulariza a vazão dos cursos d'água. Além de promover a infiltração das águas superficiais, ou seja, áreas de recarga de aquíferos (IBAMA, 2008; HAQUE *et al.*, 2018).

De acordo com Rosolen *et al.* (2015) é indispensável a necessidade de preservação dessas áreas, já que contribuem significativamente para a biodiversidade, além de oferecer um efeito esponja que amortece as mudanças na descarga devido a eventos locais de chuvas, filtram resíduos de fertilizantes e pesticidas.

2.3. Geologia Regional

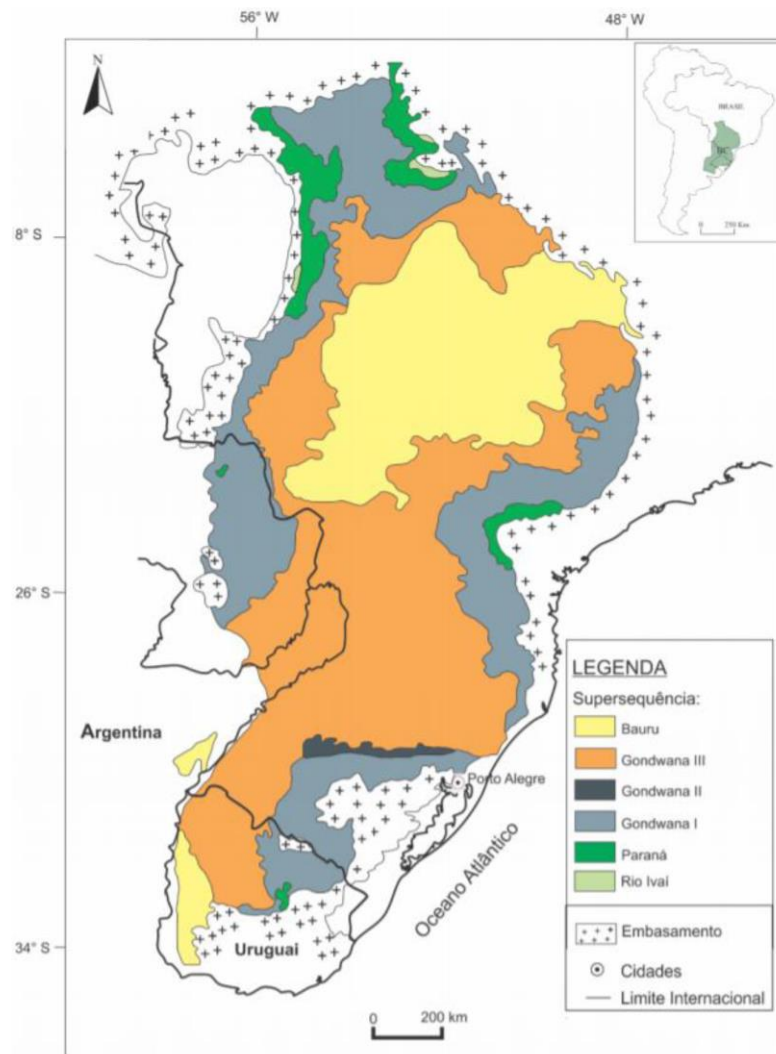
A área úmida material deste estudo, está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná.

2.3.1. Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná segundo Milani (2004) é uma grande região sedimentar do continente sul-americano que abrange territórios do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, apresentando dimensões próximas a 1,5 milhão de quilômetros quadrados. Apresentado por Schneider (1974) e Fúlfaro (1980) como uma bacia de caráter intracratônico de formato ovalado com seu maior eixo na direção Norte-Sul, composta por aproximadamente 6 quilômetros de rochas sedimentares paleozoicas, mesozoicas, cenozoicas e lavas basálticas.

A bacia compreende um pacote de rochas sedimentares-magmáticas com registro policíclico e limitado por erosões Meso-Cenozoicas de acordo com Milani *et al.*, (2007). O mesmo autor reconheceu seis unidades denominadas de Supersequências, que são separadas por hiatos deposicionais: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico a Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Figura 3).

Figura 3: Mapa geológico simplificado das Supersequências da bacia do Paraná no Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai



Fonte: Rios (2017), modificado de MILANI (2004)

2.3.2. Contexto geológico da bacia do paraná no Estado de São Paulo

A área de estudo está localizada na porção centro-norte da bacia Sedimentar do paraná, onde ocorre apenas a Supersequência Gondwana I. A fim de restringir e exemplificar o local de estudo, que se encontra na Formação Tatuí, foi utilizada a Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná região de Rio Claro / Limeira / Piracicaba (SP) do Perinotto *et al.*, 2008 (Figura 4).

Figura 4: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro/Limeira/Piracicaba (SP)

COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NA REGIÃO DE RIO CLARO/LIMEIRA/PIRACICABA (SP)							
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Aprox. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENOZOICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRE. COLUVIÕES
	TERCIÁRIO		ITAQUERI		100	ARENITOS CONGLOMERÁTICOS E ARENITOS SILICIFICADOS / FERRICRETES	CONTINENTAL: LEQUES ALUVIAIS FLUVIAL E LACUSTRE
MESOZOICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE. DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO	MAGMATISMO FISSURAL
	JURÁSSICO		BOTUCATU		100	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E BEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA	CONTINENTAL: DESÉRTICO
	TRIÁSSICO		PIRAMBÓIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS. DIVERSOS NÍVEIS DE LAMITOS	CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
				CORUMBATAI		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS E COQUINAS <i>(Argilitos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)</i>
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	IRATI		40	FOLHELHOS, SILTITOS, FOLHELHOS PIROBETUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS	TRANSICIONAL: LAGUNA MARINHO RASO: PLATAFORMA
				TATUI		50	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS
	CARBONIFERO	ITARARÉ	Grupo ITARARÉ (Indiviso no Estado de São Paulo)		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS TILITOS)	CONTINENTAL (GLACIAL): ALUVIAL - LEQUES E FLUVIAL; LACUSTRE TRANSICIONAL: DELTAS MARINHO (GLÁCIO-MARINHO): PLATAFORMAL
			Pré-Cambriano	EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS

Fonte: Adaptado de Perinotto & Zaine (2008), modificado de Soares & Landim (1975)

A Formação Tatuí, de idade Eo-Permiana, ocorre no local de estudo e recobre o Grupo Itararé com contato transicional, é caracterizada por siltitos e siltitos arenosos, com intercalações proeminentes de rochas carbonáticas. De acordo com Chahud (2011), há quatro fácies principais na unidade:

- Inferior de arenitos finos e paleoambiente incerto;
- Siltitos arenosos com fósseis de água doce;
- Arenitos grossos ou conglomeráticos, denominados fácies Ibicatu, com caules fossilizados;
- De topo com influência marinha, apresenta grandes estratificações cruzadas e estratificações do tipo *hummockie*.

Segundo Petri e Fúlfaro (1983), a porção inferior da Formação é caracterizada por siltitos vermelhos e arenitos finos. Já a porção superior é de coloração verde a cinza com siltitos ricos em carbono, considerando um ambiente redutor.

A Formação Tatuí é formada em ambiente transicional de planície costeira e marinho raso plataformal, com espessura máxima de 35 metros (PERINOTTO & ZAINÉ, 2008).

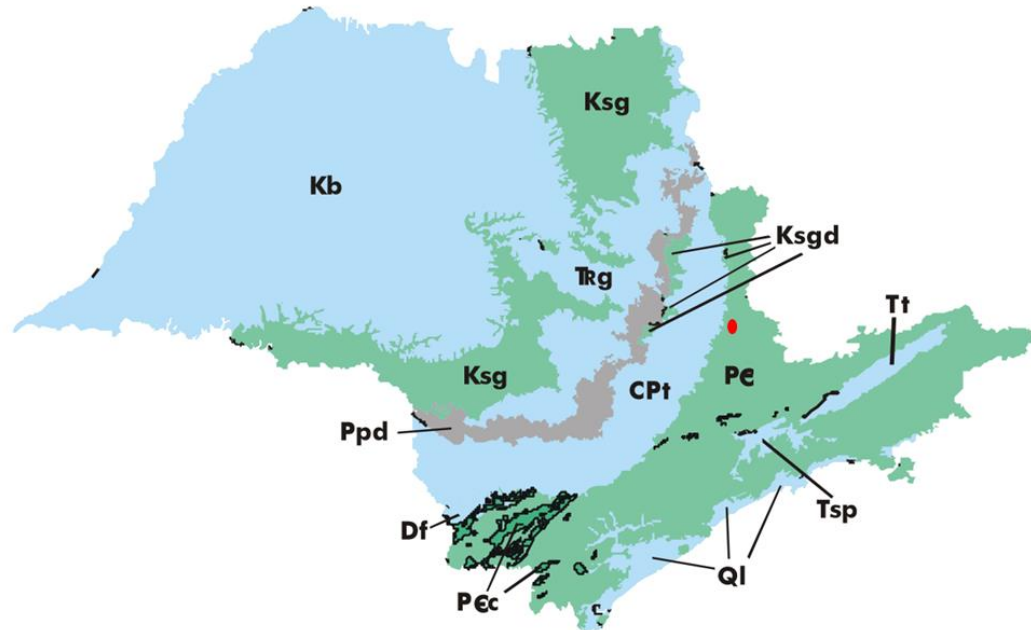
2.4. Aquífero Tubarão

O local da Área Úmida encontra-se sobre o Aquífero Tubarão, sendo que este situa-se acima de rochas pré-cambrianas ocorrendo na porção leste da Depressão Periférica Paulista (ROCHA, 2006) (Figura 5). Ainda segundo Rocha (2006) o aquífero é composto pelos Grupos Itararé, Formação Aquidauana e Grupo Guatá, sendo o último constituído pela Formação Tatuí. Se comporta como unidade hidrológica heterogênea, descontínua e anisotrópica (ODA, 2012).

O Sistema Aquífero Tubarão (SAT) é caracterizado como granular, de porosidade primária em condições de confinamento e/ou semiconfinamento. Assim a circulação e o armazenamento de água estão associados tanto aos poros das rochas como às suas descontinuidades estruturais, como juntas, fraturas ou falhas, classificado como porosidade secundária (ODA, 2012).

De acordo com Oda (2012), o SAT é considerado um aquífero sedimentar de baixa produtividade na Bacia do Paraná, uma vez que os poços raramente atingem vazões superiores a 10 m³/h (DAEE/IG/IPT/CPRM 2005), devido a heterogeneidade litológica e a descontinuidade das camadas.

Figura 5: Localização dos aquíferos paulistas. Do mais antigo para o mais jovem: pré-Cambriano (P€), pré-Cambriano cárstico (P€c), Furnas (Df), Tubarão (CPt), Guarani (TRg), Serra Geral (Ksg), Serra Geral Diabásio (Ksgd), Bauru (Kb), São Paulo (Tsp), Taubaté (Tt), Litorâneo (Ql). Em vermelho a localização da área.



Fonte: Rocha, Gerônimo *et al.*, 2006.

O SAT estende-se por uma estreita faixa com aproximadamente 20.700 km² no sentido nordeste-sul do Estado de São Paulo, onde é uma importante fonte de água subterrânea para o abastecimento público e privado de vários centros urbanos, especialmente nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba-Capivari-Jundiá e Sorocaba-Médio (ODA, 2012; MONTANHEIRO, 2014).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Conceitos de Geofísica

A geofísica é definida como a ciência que estuda a Terra por métodos indiretos, aplicando princípios físicos para entender estruturas internas do planeta. A investigação pode se dar através da superfície, perfilações ou por levantamentos aéreos, transmitindo as variações das propriedades físicas lateral e verticalmente, dependendo das rochas e constituintes presentes (KEAREY, et al., 2002).

Segundo Orellana (1972) os métodos geofísicos são divididos em dois grupos, sendo o primeiro os resultantes de campo natural que utilizam campo gravitacional, magnético, elétrico e eletromagnético terrestre, e o segundo grupo de origem artificial, envolvendo métodos de geração de campo elétrico ou eletromagnético local. A aferição das ondas sísmicas, propagação e velocidade, nos leva ao entendimento da distribuição de camadas e estruturas em subsuperfície.

3.1.1. Propriedades Elétricas de solos e rochas

Os métodos de prospecção geoeletrica utilizam parâmetros elétricos inerentes ao solo e rocha, como a resistividade, polarização, condutividade, potencial espontâneo, para realizar a investigação de geologia de subsuperfície. Compreendem o método da Eletroresistividade, método da Polarização Induzida (IP), o método do Potencial Espontâneo (SP) e os métodos Eletromagnéticos (KEAREY, et al., 2002).

A condução de corrente elétrica é definida como a movimentação de partículas carregadas através dos materiais. A facilidade de mover as partículas (elétrons e íons) está ligada à quantidade de elétrons livres disponíveis e na configuração das bandas energéticas (HALLIDAY et al., 1993).

Por Orellana (1972) a condução de corrente elétrica ocorre nas rochas de maneira eletrônica, dielétrica e eletrolítica. A primeira, no meio geológico, ocorre com metais nativos, sulfetos e carbono na forma de grafita. Enquanto a condução eletrolítica ocorre quando a corrente elétrica é conduzida por meio de íons dissolvidos na água (KEAREY

et al., 2002). Segundo Mcneill (1980), a resistividade é influenciada em solos e rochas por: porosidade; quantidade de poros preenchidos por água ou quantidade de solução presente; concentração de sólidos totais dissolvidos (STD); temperatura e estado físico da água nos poros e por fim a concentração e composição das partículas.

3.1.2. Método de Eletrorresistividade

A resistividade elétrica é definida por Telford (1990) como a medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra para a sua passagem em um dado material. É uma das propriedades físicas mais variáveis. A maior parte dos minerais formadores de rocha é isolante, porém a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela passagem de íons nas águas dos poros, sendo a porosidade o principal controle da resistividade das rochas (KEAREY et al., 2002).

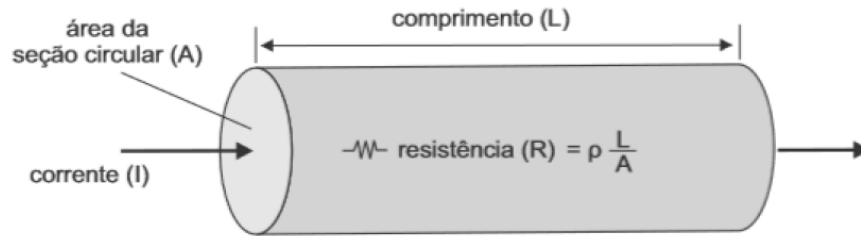
A capacidade que um material condutor tem de se opor a passagem da corrente elétrica, é denominada resistência elétrica (R), e Ohm (Ω) é sua unidade de medida. Conforme a Primeira Lei de Ohm, se um condutor ôhmico é mantido a temperatura constante, a intensidade (i) de corrente elétrica será proporcional a diferença de potencial (ddp) aplicada entre suas extremidades, assim a resistência elétrica é constante (HALLIDAY et al., 1993).

$$\frac{V(\text{Volts})}{i(\text{Amperes})} = R (\Omega) \quad (\text{Equação 1})$$

São necessárias três propriedades de um corpo para obter a resistência (R), sendo elas a área de seção transversal (A), seu comprimento (L) e sua resistividade (ρ) (Figura 6). A segunda Lei de Ohm estabelece a relação entre essas propriedades, sendo a resistividade elétrica (ρ) inerente ao material, delimitando o quanto se opõe a passagem de corrente elétrica.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{Equação 2})$$

Figura 6: Fluxo de corrente num condutor linear de comprimento L , resistência R e área de seção A



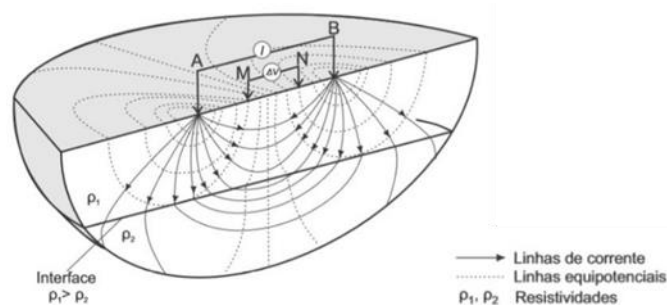
Fonte: Knodel (2008)

O método da eletrorresistividade forma-se através da aplicação de uma corrente elétrica, gerada artificialmente, no solo por meio de eletrodos introduzidos na terra, conectados aos terminais de uma fonte geradora (bateria). A diferença de potência (ddp) gerada pela passagem da corrente elétrica nos diferentes materiais geológicos, são aferidas pelo par de eletrodos potenciais, juntamente com a posição de cada eletrodo e profundidade (KEAREY *et al.*, 2002).

Em um modelo teórico, o meio é homogêneo e isotrópico, quanto mais distante da fonte menor seria o potencial elétrico, gerando assim superfícies semiesféricas concêntricas com valores potenciais iguais. Perpendicularmente a estas linhas equipotenciais, passam as linhas de fluxo, cujo sentido é do maior para o menor potencial elétrico (ROBINSON, 1988).

Para que ocorra a propagação do campo elétrico no meio são utilizados dois eletrodos de corrente (geradores da ddp) A e B e dois eletrodos de leitura, que são os eletrodos potenciais M e N (Figura 7).

Figura 7: Propagação do campo elétrico em meio isotrópico e tridimensional, por associação de quatro eletrodos



Fonte: Knodel (2008)

Quanto ao método utilizado em estudos geológicos, que é considerado heterogêneo e anisotrópico, é necessário o uso de um fator geométrico denominado constante K. Devido aos fatores supracitados, os valores de comprimento e área são substituídos por uma constante K que irá depender do arranjo utilizado. Uma vez que a resistividade medida não é representativa de uma rocha ou camada específica, e sim uma resistividade média de todo o pacote estudado, chamada resistividade aparente. (SHERIFF, 1989; BORGES, 2002).

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)\right]} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \quad (\text{Equação 4})$$

onde ρ_a é a resistividade aparente, ΔV a variação potencial e K o fator geométrico.

3.1.3. Arranjo Schlumberger

Se tratando do método de eletrorresistividade existem várias técnicas de aquisições de dados em campo, além da variedade de disposição de eletrodos. De acordo com Kearey (2002) as técnicas mais difundidas são a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Tomografia Elétrica (TE) e a Perfilagem Elétrica de Poços (PEP).

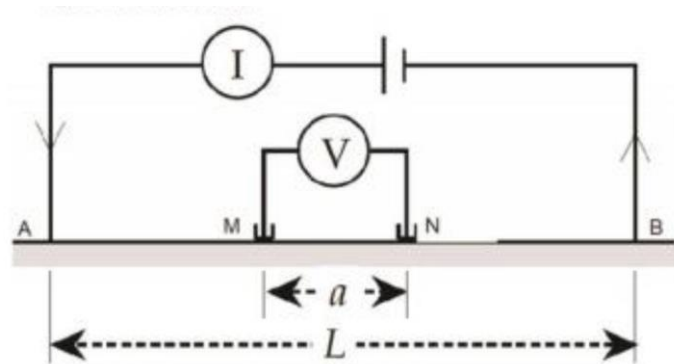
A técnica de Tomografia Elétrica é eficaz na delimitação de variações de resistividade elétrica vertical e horizontal em função da natureza intrínseca do material e profundidade (MUSSET E KHAN, 2000). Neste trabalho foi utilizada esta técnica, tendo em vista que o objetivo era a identificação de variações laterais da resistividade.

As inúmeras disposições de eletrodos existentes durante a investigação geofísica, são denominadas de arranjos de campo. As principais são Schlumberger, Wenner e Dipolo-Dipolo. Cada arranjo implica numa profundidade de investigação alcançada, resolução espacial e processamento de dados. De acordo com Loke (2000), a alta intensidade de sinal do arranjo Schlumberger e leituras menos susceptíveis a interferências produzidas por ruídos indesejáveis, é o arranjo menos passível a erros

interpretativos em terrenos não homogêneos, sendo assim, foi utilizado esse arranjo neste trabalho.

A configuração do arranjo Schlumberger é simétrica em relação a um ponto central, envolve quatro eletrodos. Os dois eletrodos de corrente (AB) são externos e os dois internos são de diferença de potencial (MN), postos de maneira linear na superfície do terreno (Figura 8) (LOWRIE, 2007). Segundo Barker (1981) esta disposição de eletrodos tem grande potencialidade para resolução de estruturas horizontais, e resolução vertical satisfatória.

Figura 8: Disposição dos eletrodos no arranjo Schlumberger



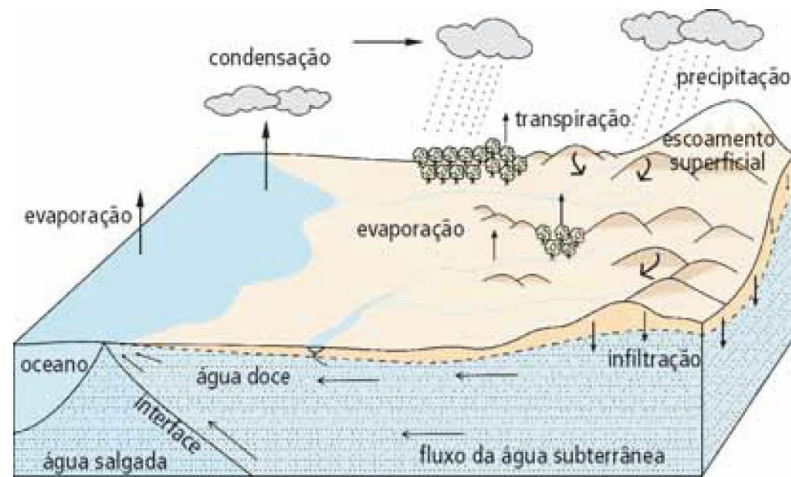
Fonte: Lowrie (2007)

Durante a aquisição de dados, os eletrodos AB estão afastados do centro por uma distância L e os eletrodos MN estão espaçados por uma distância a . A cada ensaio a distância $2L$ entre os eletrodos de corrente (AB) é aumentada simetricamente em relação ao ponto central. Enquanto a distância entre os eletrodos de potencial (MN) em relação ao centro é mantida fixa. A distância MN sempre será menor em relação a AB, neste arranjo.

3.2. Conceitos de hidrogeologia

A água é a substância mais abundante na superfície do planeta e o que mantém a vida sobre a Terra. Distribui-se na atmosfera e na parte superficial da crosta até uma profundidade de máxima de aproximadamente 10 km, constituindo os reservatórios (KARMANN, 2000). O movimento contínuo da água entre diferentes reservatórios, como os oceanos, geleiras, rios, lagos e água subterrânea, é denominado ciclo da água (Figura 9) (IRITANI & EZAKI, 2008).

Figura 9: O ciclo da água



Fonte: Iritani & Ezzaki, 2008

De acordo com Karmann (2000), o ciclo se inicia com o fenômeno da precipitação meteórica, que representa gotículas a partir do vapor de água presente na atmosfera, depois a precipitação ocorre sob forma de neve, granizo ou água. Ainda segundo o mesmo autor, parte da precipitação regressa para a atmosfera por evaporação direta, durante seu percurso em direção a superfície.

No momento em que a água atinge o solo, pode ocorrer o processo de infiltração ou escoamento superficial. O primeiro permite que a água seja levada para a subsuperfície, atingindo estratos mais profundos, preenchendo poros e vazios. Enquanto o processo de escoamento superficial escoar a água para porções mais baixas

topograficamente, uma vez que a capacidade de absorção da superfície atingiu seu limite (IRITANI & EZAKI, 2008).

É classificada como água subterrânea toda água que ocupa vazios em formações rochosas ou no regolito (KARMANN, 2000).

3.2.1. Parâmetros Hidrogeológicos

Para entender o funcionamento do sistema aquífero de forma integrada são fundamentais alguns parâmetros hidrogeológicos, como a porosidade, permeabilidade, condutividade hidráulica.

3.2.1.1. Porosidade

Definida pela relação entre o volume de poros (vazios) e volume total de um certo material, pode ser considerada primária ou secundária. A primária é uma porosidade criada junto com o sedimento ou rocha, formada pelos espaços entre os clastos e grãos ou planos de estratificação. A porosidade secundária se desenvolveu após a formação das rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, por processos de fraturamento ou falhamento. E há um tipo especial de porosidade cárstica, também secundária, criando vazios por dissolução em rochas solúveis (KARMANN, 2000).

$$P = \frac{V_v}{V} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo V_v volume de vazios e V o volume total.

3.2.1.2. Permeabilidade

Essa propriedade é dada em função da granulometria e disposição estrutural do material poroso (HISCOCK, 2009). Assim é definida como a capacidade em permitir o fluxo de água através dos poros (KARMANN, 2000).

O que determina a disponibilidade de água subterrânea não é apenas a quantidade de água que os materiais geológicos armazenam, mas também a capacidade que eles têm de transmitir o fluxo. Um sedimento argiloso é altamente poroso, mas sua

permeabilidade é baixíssima, quase impermeável, devido ao tamanho do poro. (HISCOCK, 2009; KARMANN, 2000; IRITANI & EZAKI, 2008).

3.2.1.3. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (K) estipula a capacidade de movimentação da água através dos poros das rochas e material geológico, integrando as propriedades de porosidade e migração de fluido. Medindo a velocidade em m/s, a facilidade de movimentação da água pelos materiais porosos (CLEARY, 1989).

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde K é a condutividade hidráulica, γ é o peso específico e μ é a viscosidade do fluido.

De acordo com Hiscock (2005) as propriedades do material geológico irão influenciar significativamente a isotropia e homogeneidade da distribuição da condutividade hidráulica. Usualmente materiais de granulação grossa e fraturados apresentam altos valores de condutividade hidráulica, em contrapartida sedimentos de granulação fina e geram valores baixos. E os valores tendem a aumentar de acordo com o aumento da porosidade e tamanho do grão em materiais inconsolidados (HÖLTING *et al*, 2019).

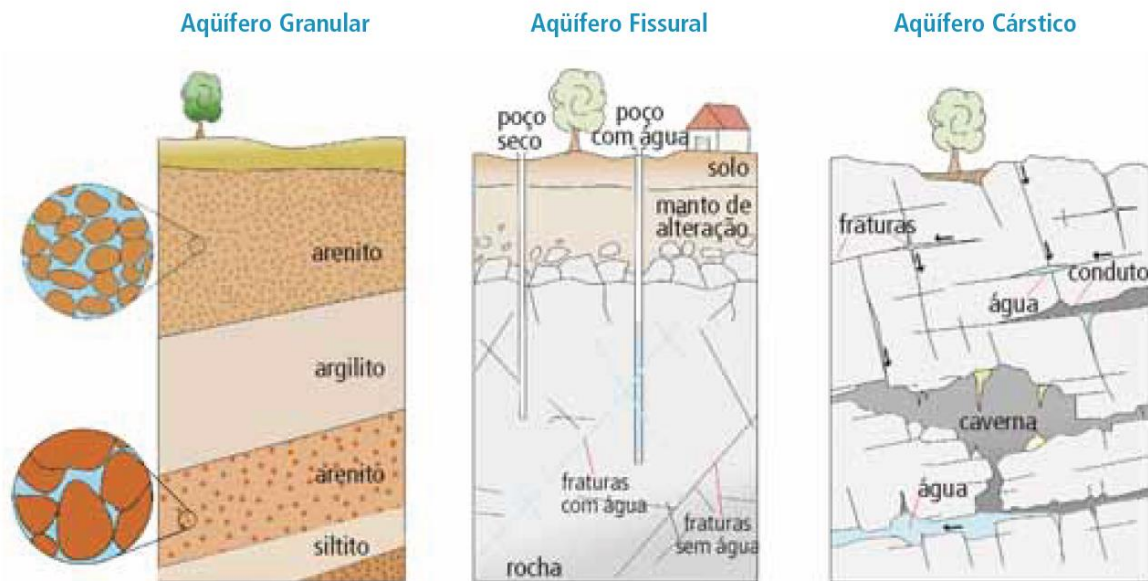
3.2.2. Aquífero

Definido como um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou unidades de sedimentos suficientemente porosas e permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água, sob gradientes hidráulicos naturais (IRITANI & EZAKI, 2009). Podem ter algumas classificações, quanto ao tipo de porosidade da rocha e características hidráulicas.

Em relação a porosidade da rocha armazenadora pode ser do tipo granular, fissural ou cárstico (Figura 10). O granular se apresenta em regolitos e rochas sedimentares clásticas de porosidade primária. Já os aquíferos de fraturas são originados em decorrência de deformação tectônica, comumente associados a processos de

dobramento e falhamentos. Por último, aquíferos de conduto ou cárstico caracterizam-se pela rede de condutos gerados pela dissolução de rochas carbonáticas (IRITANI & EZAKI, 2009; KARMANN, 2000).

Figura 10: Classificação dos aquíferos de acordo com o tipo de porosidade da rocha

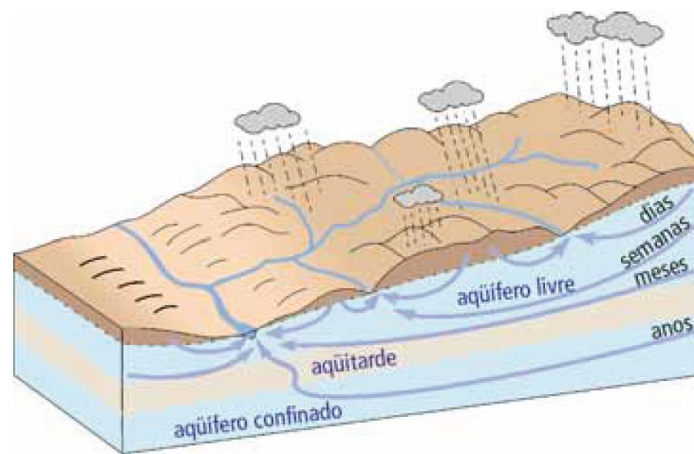


Fonte: Iritani & Ezzaki, 2009

Quanto as suas características hidráulicas, são chamados de livres ou confinados, de acordo com a pressão a que estão submetidos. O aquífero livre ou freático está mais perto da superfície, ficando submetido a pressão atmosférica e a água que penetra no solo atravessa pela zona não saturada e recarrega diretamente o aquífero (IRITANI & EZAKI, 2009).

Segundo Iritani & Ezaki (2009) as águas que recarregam os aquíferos são oriundas, normalmente da chuva e infiltra em áreas aflorantes de formações geológicas, onde o aquífero é livre. Assim, circula lentamente pelos poros das rochas e a velocidade depende das características geológicas de cada local (Figura 11). Enquanto as áreas de descarga são os locais onde a água sai do aquífero, reaparecendo na superfície do terreno em forma de nascente ou escoamento de base alimentando rios e lagos.

Figura 11: Tempo de circulação da água subterrânea – recarga e descarga



Fonte: Iritani & Ezzaki, 2008

4. MATERIAIS E MÉTODOS

São aplicados neste trabalho métodos diretos e indiretos de pesquisa. O método direto de permeabilidade foi utilizado para medir a condutividade hidráulica local, enquanto a técnica da tomografia elétrica foi utilizada para determinar o parâmetro físico de resistividade elétrica no ambiente geológico.

Para melhor entendimento, este trabalho foi desenvolvido em três etapas, descritas a seguir.

4.1. Levantamento Bibliográfico

Esta primeira etapa do trabalho consiste em realizar de forma prévia e contínua, a revisão bibliográfica detalhada de trabalhos científicos relacionados ao tema. Compreende artigos e livros sobre a Bacia do Paraná, Aquífero Tubarão a fim de compreender melhor a área de estudo e caracterização. Além compreender e fundamentar os métodos aplicados, de permeabilidade e eletrorresistividade.

4.2. Aquisição de Dados

A aquisição de dados em campo foi realizada em duas etapas, a primeira de levantamento elétrico e a segunda de permeabilidade. Os dados foram coletados entre os meses de outubro e novembro de 2019, num período de seca.

4.2.1. Tomografia Elétrica

A aquisição geofísica foi realizada por meio de equipamento disponibilizado pelo laboratório de geofísica da Universidade Estadual Paulista (UNESP), o Terrameter LS, fabricado pela ABEM Instrument, Sueco (Figura 12). É composto por um módulo único de transmissão e recepção automatizado a partir de programação prévia, com 250W, resolução de 1 μ V e corrente elétrica máxima de 2,5 A.

Foram realizadas 14 linhas paralelas de tomografia elétrica, com 200 metros de comprimento cada e separadas com distância de 20 metros entre elas, compreendendo espaçamento de 10 metros entre eletrodos (21 eletrodos no total) (Figura 13). Além disso,

uma linha de controle (linha 15) foi estabelecida. A malha foi realizada de maneira que abrangesse toda a área de estudo.

Figura 12: Fotografia do aparelho Terrameter LS



Fonte: do autor

Figura 13: Malha de aquisição de dados geelétricos



Fonte: Google Earth Pro, modificada pelo autor com o software Corel Draw

4.2.2. Permeabilidade

A aquisição dos dados de permeabilidade foi realizada seguindo a mesma malha da aquisição geofísica (Figura 14). Através de um permeâmetro fixado no solo, que consiste num tubo graduado de PVC com 1 metro de comprimento e 10 centímetros de diâmetro, é feita a coleta (Figura 15). Primeiro foi utilizado um trado manual para a fixação do tubo no solo, com uma profundidade de aproximadamente 10 centímetros, em seguida o tubo é abastecido com água.

Figura 14: Malha de coleta de permeabilidade



Fonte: Google Earth Pro, modificada pelo autor com o software Corel Draw

Quando o fluxo de água é estabilizado dentro do permeâmetro, sem ocorrência de variações bruscas é quando se inicia a aquisição de dados. É anotado o tempo que decorre para infiltrar toda a quantidade de água do tubo, e as leituras que apresentam permeabilidades muito baixas foram monitoradas por 2 ou 3 horas.

Figura 15: Fotografia do permeâmetro fixado ao solo e abastecido com água



Fonte: do autor

4.3. Processamento dos dados

Esta etapa reúne todos os procedimentos, a filtragem dos dados obtidos em campo, processamento até a interpretação e elaboração da monografia.

O processamento dos dados do levantamento elétrico foi realizado pelo software RES2DINV, o qual gera modelos bidimensionais de inversão a partir dos dados inseridos, interpolando automaticamente o conjunto de dados (GEOTOMO SOFTWARE, 2004). O programa permite o processamento de grandes conjuntos de dados em duas dimensões e determinar, a partir de técnicas de modelagem numérica como o método de inversão, um modelo de resistividade e cargabilidade da área próximo ao modelo real (GRIFFITS & BARKER 1993).

Os resultados obtidos são imagens de subsuperfície para níveis de profundidade determinados e são representados por escalas de cores, para melhor delimitar o contraste entre valores de resistividade mais altos e dos mais baixos.

A coleta de dados de permeabilidade foi utilizada para gerar o parâmetro de condutividade hidráulica, a partir da equação (ABGE 2013):

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \frac{d_1^2}{8 \cdot h_0 \sqrt{dL}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde K corresponde a constante de condutividade hidráulica (cm/s); Δh é a diferença do nível piezométrico (cm); d_1 é o diâmetro externo do furo (cm); d é o diâmetro do revestimento; e h_0 indica o comprimento do revestimento (cm). Por outro lado, Δh e Δt são parâmetros obtidos durante os testes.

A partir da equação, os resultados foram convertidos em uma tabela, onde as colunas X e Y são as coordenadas e Z é o valor da condutividade hidráulica obtida (K) para cada ponto. Em seguida os dados foram lidos pelo software Oasis Montaj-Sequent gerando um mapa de variação dos valores de condutividade hidráulica, através do métodos de krigagem e interpolação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo compila os dados obtidos no trabalho de campo. Inicialmente os resultados obtidos através do ensaio de eletrorresistividade, apresentando os modelos de inversão bidimensionais. Em seguida, os resultados da condutividade hidráulica.

5.1. Eletrorresistividade

Nesta seção é apresentado o modelo de inversão 2D obtido através do levantamento geofísico de eletrorresistividade com a técnica de tomografia elétrica e arranjo Schlumberger, para as 15 linhas de aquisição (Figuras 16, 17 e 18).

É visto que as linhas de aquisição possuem 210 metros e atingiram a profundidade máxima de aproximadamente 40 metros. A escala de cor define, cores quentes para valores de alta resistividade, e cores frias para valores de baixa resistividade. Não há um padrão encontrado sobre valores de eletrorresistividade, variando entre 20 $\Omega.m$ e 2000 $\Omega.m$ de acordo com a resistividade.

Separando em níveis de resistividade, temos 3 condições:

- Alta resistividade: valores maior que 1000 $\Omega.m$;
- Média resistividade: valores entre 1000 $\Omega.m$ e 100 $\Omega.m$;
- Baixa resistividade: valores abaixo de 100 $\Omega.m$.

Zonas com altos valores de resistividade elétrica sugerem material seco, e em contrapartida, baixos valores estão associados a presença de umidade (LOKE, 2000). A partir do campo e da literatura, observa-se que o primeiro nível é tido como solo e rocha desagregada seca, seguida de rochas parcialmente saturadas e por fim rochas e zona saturada.

Em todos os perfis gerados ocorre contraste de valores de resistividade, ou seja, apresenta tons de coloração quente e fria, indicando a variação entre valores altos e baixos. Para a alta resistividade a cor varia de roxo a vermelho, para valores intermediários varia de verde a laranja, e a baixa resistividade é representada por tons de azul. Observa-se ao longo das linhas de aquisições, na porção superior, valores extremamente altos de resistividade.

Figura 16: Modelo de inversão 2D para as linhas 1 a 5

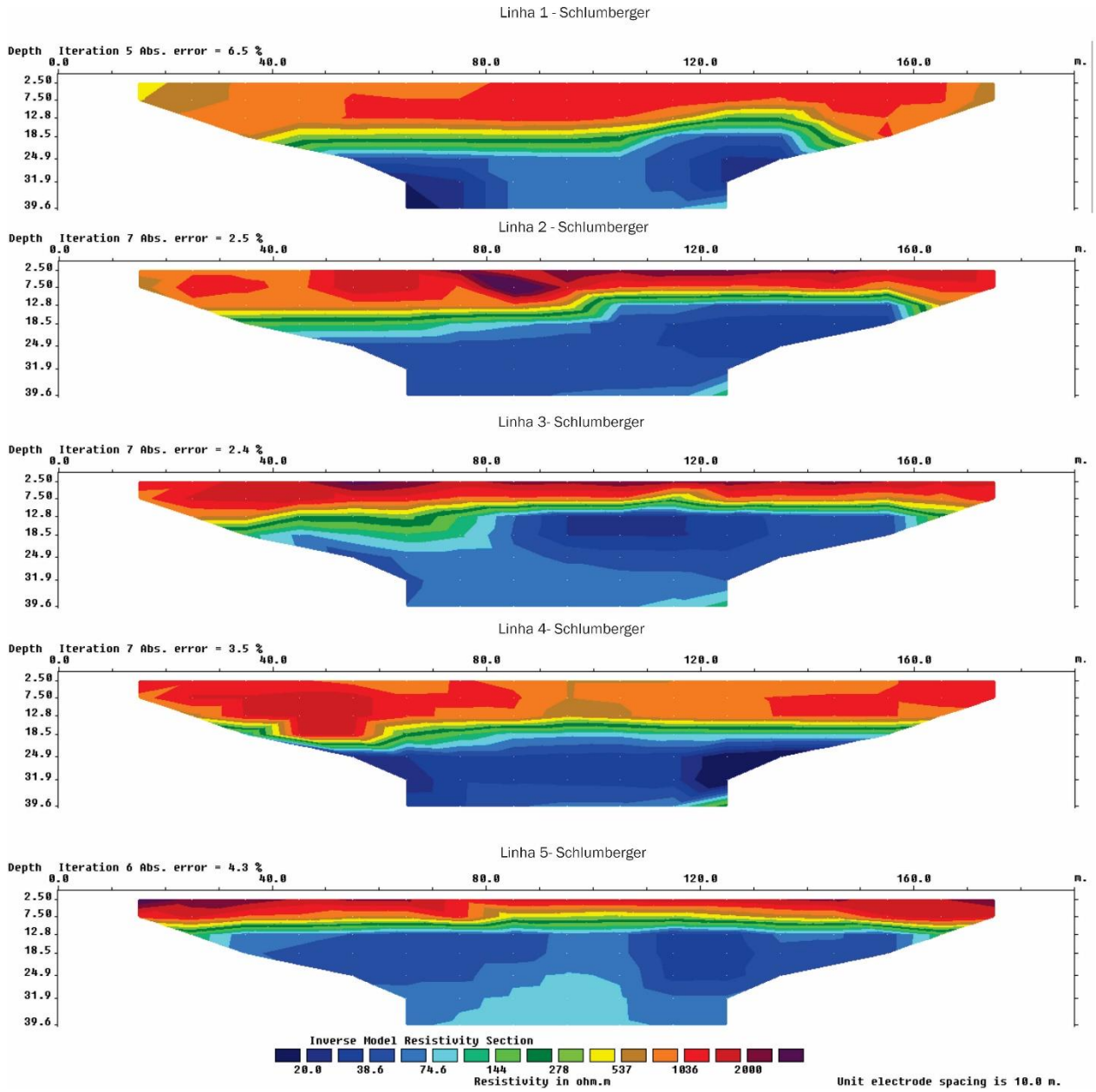


Figura 17: Modelo de inversão 2D para as linhas 6 a 10

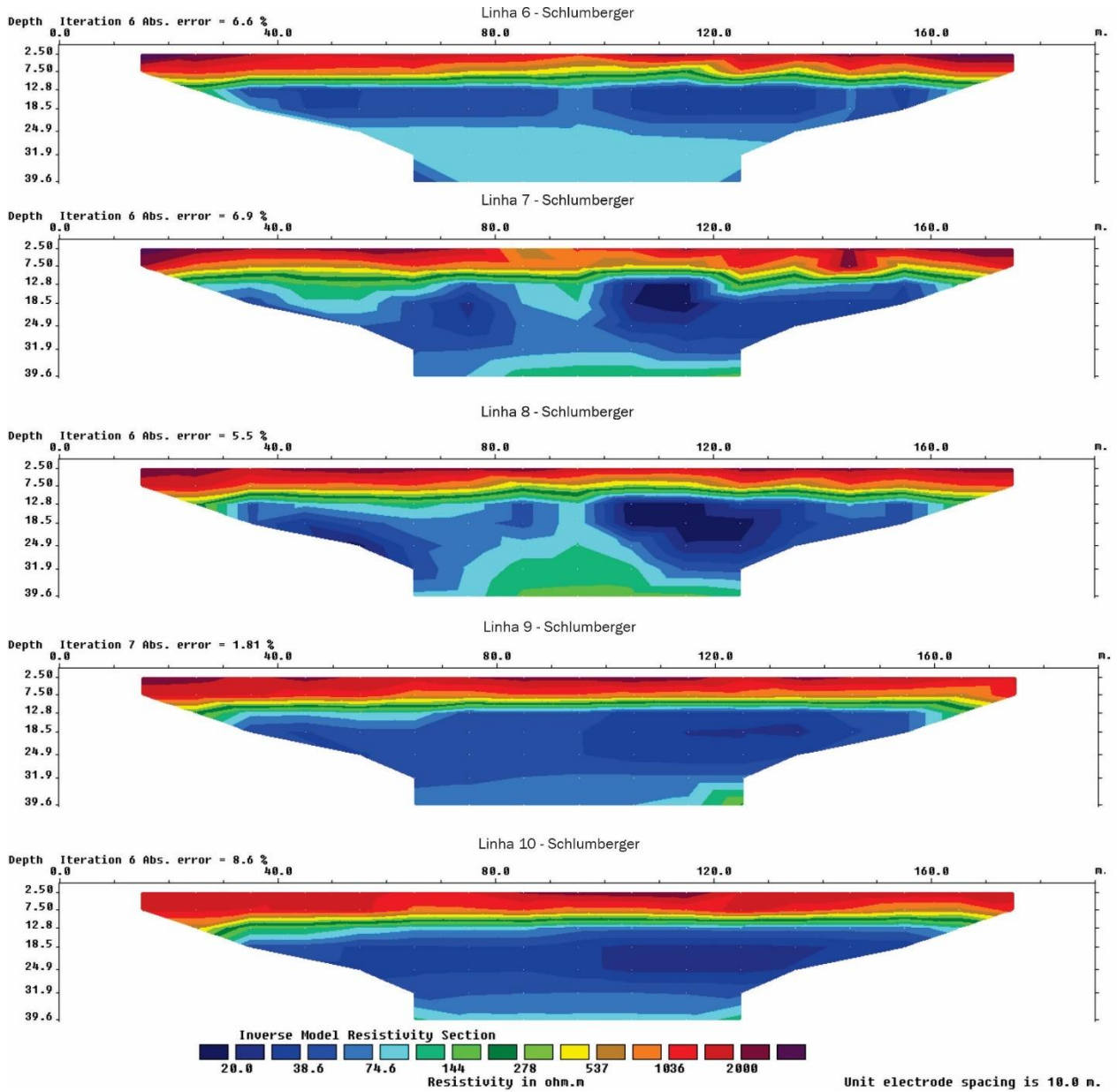
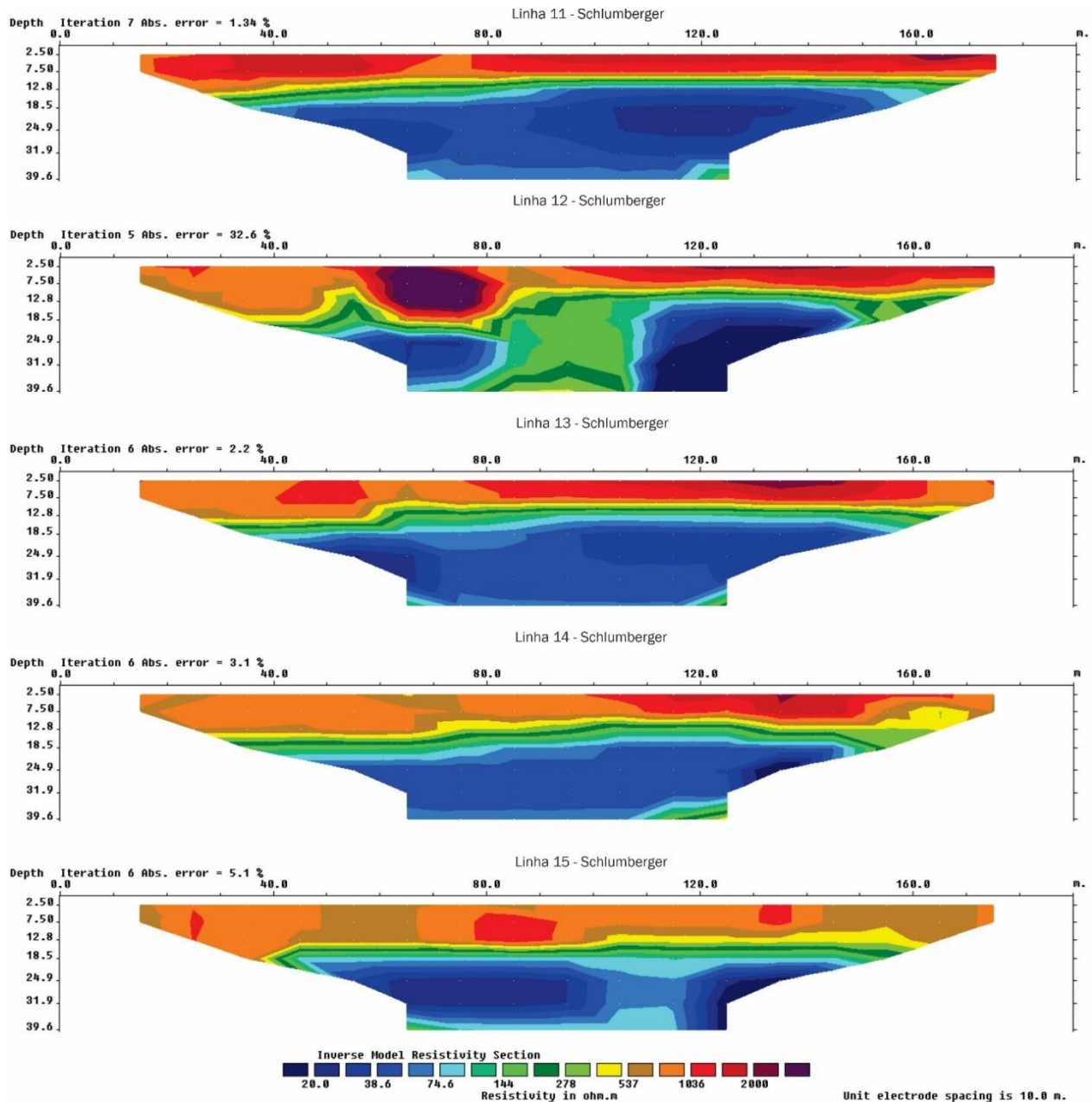


Figura 18: Modelo de inversão 2D para as linhas 11 a 15



O arranjo Schlumberger é adequado para delimitar estruturas verticais, já que em relação a outros arranjos possui maior densidade de medidas, proporcionando uma melhor resolução dos dados (LOKE, 2000). Assim todas as linhas bidimensionais apresentam resistividade média a alta nas porções mais superficiais, e baixa nas porções mais profundas.

As zonas de baixa resistividade, tons azuis, apresentam continuidade lateral. Por se tratar de uma zona saturada ou composta por rochas arenosa-siltosa, indica a distribuição e recarga lateral do aquífero Tubarão.

Os tons de resistividade intermediária indicam zonas de transição entre o solo seco e a zona saturada, sugerindo umidade. Na superfície dos perfis aparecem zonas de resistividade mais altas, em praticamente toda sua extensão. Relacionando assim a solos e saprólitos secos. Observa-se nos perfis que as camadas de saprólito são mais espessas na borda da área de estudo.

É notado nas linhas de aquisição 7, 8 e 12 (Figuras 17 e 18) camadas horizontais bem delimitadas, além de zonas de infiltração verticalizadas com 7 metros de profundidade em média. Nesses locais onde a resistividade é extremamente alta e há conexão vertical com a baixa resistividade, é onde a água flui verticalmente, sendo um fluxo direto que recarrega o aquífero.

5.2. Condutividade Hidráulica

A partir dos valores obtidos em campo e do processamento dos dados foi obtido o mapa de condutividade hidráulica, o qual foi sobreposto à imagem de satélite da área úmida de estudo (Figura 19).

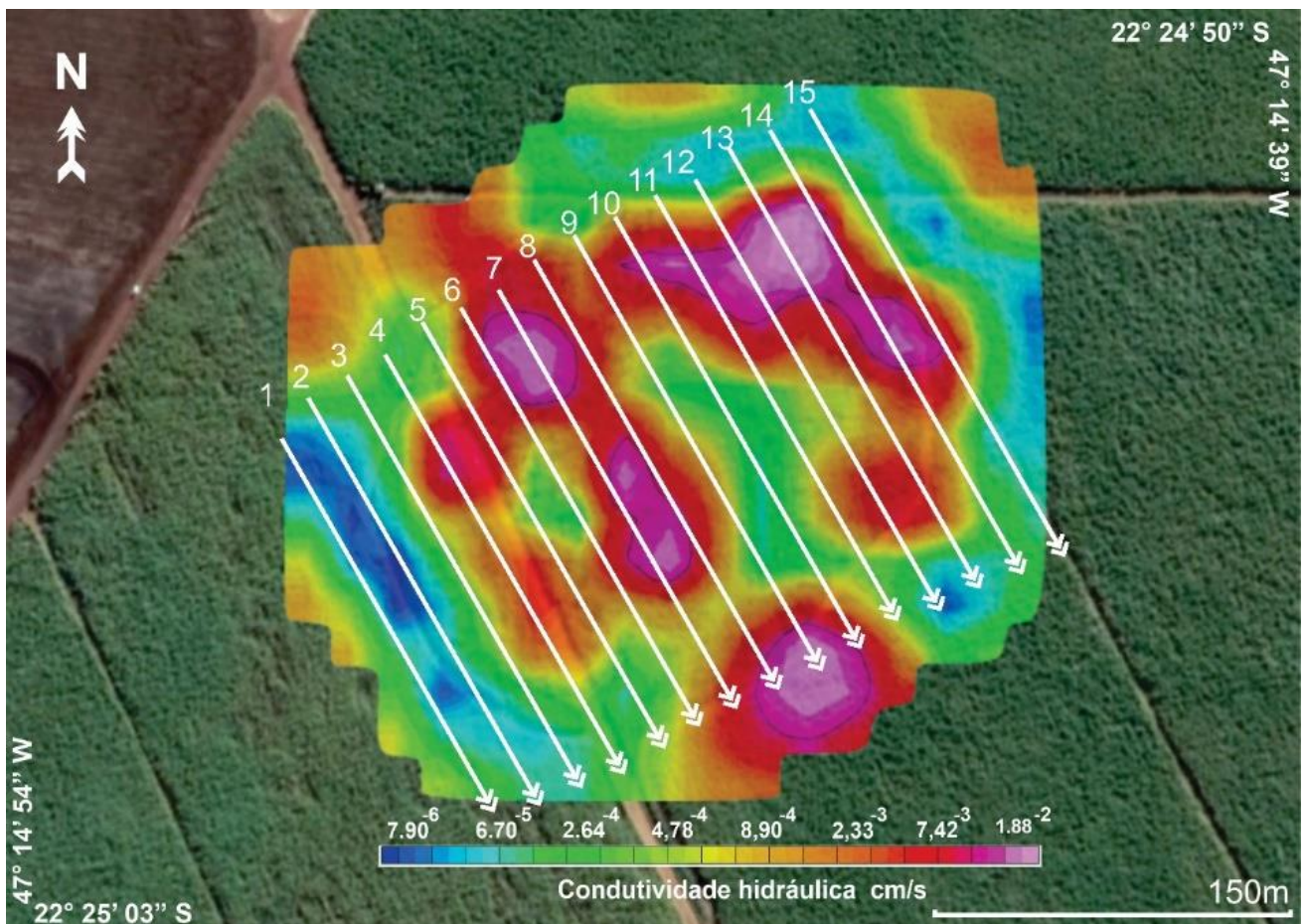
O mapa é representado através de escala de cores, variando de cores quentes a frias. As cores quentes são valores de condutividade hidráulica (K) mais altos, enquanto os menores valores de K são representados pelas cores frias.

Os valores de condutividade hidráulica são influenciados pela heterogeneidade do solo, relacionando parâmetros de granulometria, densidade, compactação, desnudação, macroporosidade, uso do solo, dinâmica do ecossistema (SOUSA & CELLIGOI, 2009). A interpretação da área parte do princípio de que o local é composto de material arenoso-siltoso.

Observa-se que os valores mais altos de K estão localizados dentro da área úmida em questão, representados pelas cores vermelha e rosa no centro e centro-nordeste do mapa. Estas áreas estão abrangendo a variação de K entre $2,33^{-3}\text{cm/s}$ até $1,88^{-2}\text{cm/s}$.

Os principais pontos de infiltração de água são representados na figura pelos maiores valores de condutividade hidráulica. Estas zonas indicam que a permeabilidade está maior, o solo está absorvendo a água mais rapidamente em comparação as demais. A maior infiltração é relacionada ao material superficial mais seco, sendo o solo ou rocha desagregada seca.

Figura 19: Mapa de condutividade hidráulica sobreposto a imagem de satélite da área de estudo e linhas de aquisição geofísica

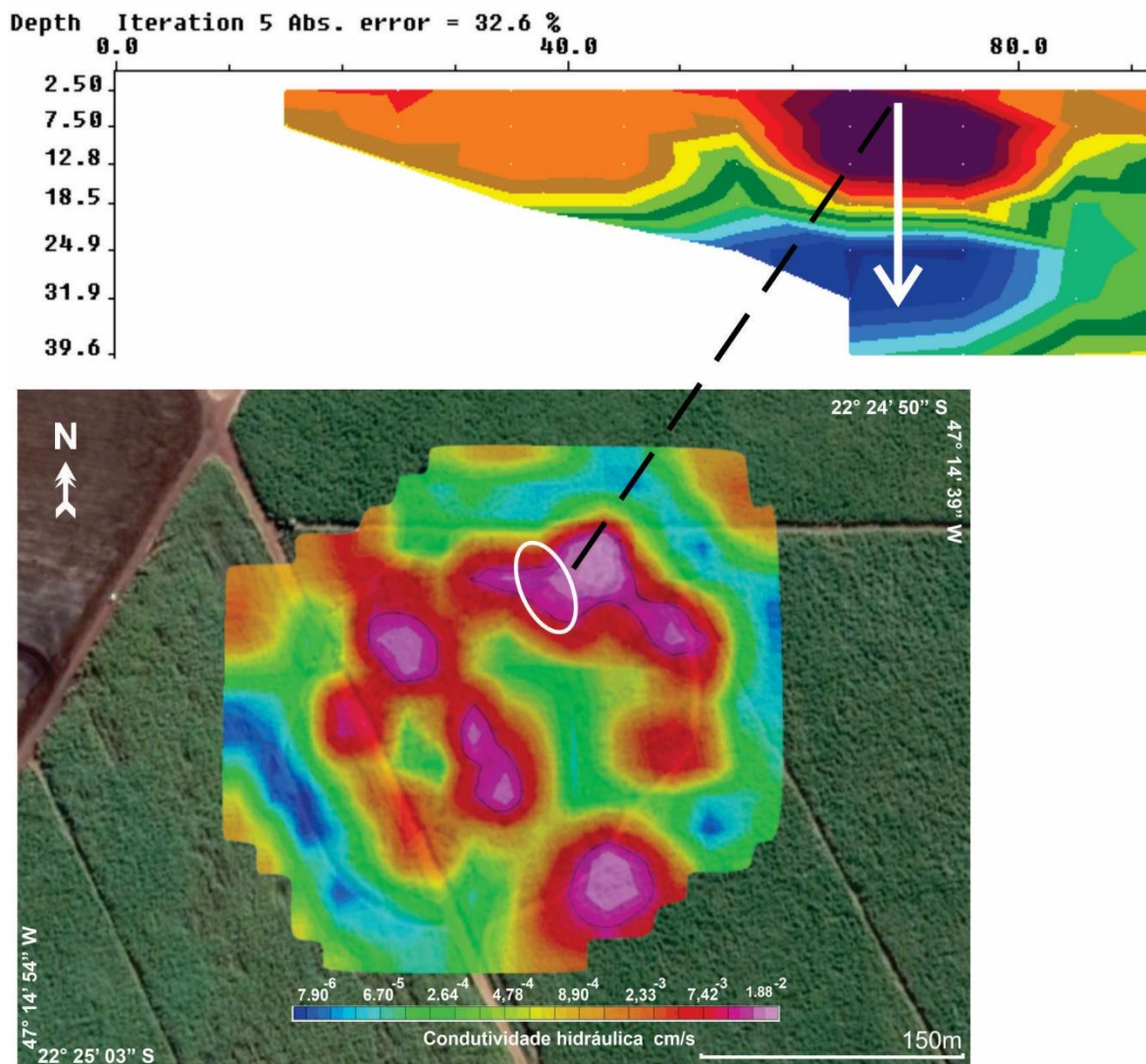


Fonte: Maxar Technologies (2020)

É possível afirmar que nesses locais de maior infiltração é onde ocorre a recarga superficial do aquífero através da correlação com os dados da eletrorresistividade. Os perfis 7, 8 e 12 (Figuras 17 e 18) mostram um canal preferencial vertical que liga os pontos de maior resistividade com os de menor resistividade.

Percebe-se que os dados da condutividade hidráulica e os da eletrorresistividade são complementares. Os solos mais secos são os mais resistivos, representados pela cor roxa nos modelos de inversão, e nesses pontos é onde a água infiltra mais rapidamente, tendo maior permeabilidade, comprovado pelos dados da condutividade hidráulica (Figura 20).

Figura 20: Correlação entre zonas de alta condutividade hidráulica e alta resistividade, indicando canal preferencial vertical de recarga



A demonstração do caminho preferencial vertical do fluxo de água, evidenciado pela tomografia elétrica e pontos de concentração de maior condutividade hidráulica em superfície prova que o local de estudo é de fato uma zona de recarga.

O entorno do local de estudo é ocupado predominantemente pelo cultivo da cana-de-açúcar a partir de 1944 (Araras, 2022). Até então era uma região de grande importância na produção cafeeira da região, tendo grande destaque entre 1860 e 1877. O intenso uso do solo na atividade agrícola baseada na aplicação de fertilizantes e pesticidas influenciam na qualidade local da água retida pela área úmida.

Deve-se destacar que o reconhecimento dessas áreas é necessário não somente devido a importância deste ecossistema, mas também ao que elas podem proporcionar a sociedade e ao meio ambiente. A sua preservação promove a absorção e estocagem de água da chuva, recarga do lençol freático, manutenção da biodiversidade entre tantos outros. E as inúmeras intervenções antrópicas, desde transformação da terra para fins agrícolas ou para empreendimentos, interrompe a preservação e manutenção das áreas úmidas.

6. CONCLUSÃO

A utilização da técnica de tomografia elétrica associada a ensaios de permeabilidade para a conversão em condutividade hidráulica, resultou em dados suficientes para o entendimento mínimo da relação de dinâmica hídrica superficial e subsuperficial. Integrando os dados é possível afirmar que as águas superficiais e o aquífero são conectados.

A técnica da tomografia elétrica com o arranjo Schlumberger proporcionou uma análise completa da interação entre a superfície e o subsolo, principalmente por mostrar melhor resolução em profundidade. É evidenciado um eixo central de infiltração, com contribuição lateral em profundidade para alimentar o aquífero Tubarão.

Os ensaios de permeabilidade determinaram os valores da condutividade hidráulica, sendo os principais pontos de infiltração os maiores valores obtidos. Essas coletas feitas em superfície não devem ser relacionadas diretamente aos resultados em profundidade da geofísica, porém podem ser usadas para indicar pontos da superfície que recarregam o aquífero.

O estudo demonstrou que a área úmida em questão, é uma região de recarga de aquífero. Há locais no centro e centro-nordeste da área, onde ocorre um escoamento vertical preferencial, sendo um fluxo direto da superfície ao aquífero em suspensão.

Tais métodos se mostraram eficientes na identificação de processos de dinâmica superficial e subsuperficial observados em áreas úmidas. O aprimoramento das definições de área úmida é essencial na questão da legislação ambiental e governança desses ecossistemas.

O estudo deixa como desafio futuro a aplicação de manejo e gestão das áreas úmidas, expondo sua importância. Podem ser aplicados métodos que amenizem o uso extensivo do solo, como a técnica de curva de nível. Visando evitar que seja carregado fertilizantes e pesticidas diretamente a área úmida, e por consequência atingindo o aquífero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Ensaio de Permeabilidade em solos orientações para sua execução no campo**. 2013.

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **A depressão periférica paulista: um setor das áreas de circundesnudação pós-cretácica na Bacia do Paraná**. Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia, 1969.

ARARAS- Disponível em: <https://araras.sp.gov.br/historia/>. Acessado em: 07/03/2022.

BARKER, R. D. The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. **Geophysical prospecting**, v. 29, n. 1, p. 128-143, 1981.

BORGES, Welitom Rodrigues; PORSANI, Jorge Luís. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, p. 187-192, 2002.

CHAHUD, Artur. Geologia e paleontologia das formações Tatuí e Irati no centro-leste do Estado de São Paulo. **Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado. 299p**, 2011.

CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. In: **Engenharia hidrológica**. ABRH, 1989. p.293-403.

DA CUNHA, Catia Nunes; PIEDADE, Maria Teresa Fernandez; JUNK, Wolfgang J. (Ed.). **Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats**. EdUFMT, 2015.

DAEE, IPT, CPRM. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000. São Paulo: DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica: IG-Instituto Geológico: IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: CPRM-Serviço Geológico do Brasil. 2005.

FÚLFARO, V. J.; GAMA JR, E.; SOARES, P. C. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. **São Paulo: Paulipetro**, 1980.

GEOTOMO SOFTWARE. Disponível em <<https://www.geotomosoft.com/>>. Acessado em: 10 de julho 2021.

GRIFFITHS, D. H.; BARKER, R. D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. **Journal of applied Geophysics**, v. 29, n. 3-4, p. 211-226, 1993.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4. ed. Wiley & Sons, Inc. 1993.

HAQUE, Aminul; ALI, Genevieve; BADIOU, Pascal. Hydrological dynamics of prairie pothole wetlands: Dominant processes and landscape controls under contrasted conditions. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 15, p. 2405-2422, 2018.

HISCOCK, Kevin M. **Hydrogeology: principles and practice**. John Wiley & Sons, 2009.

HÖLTING, Bernward; COLDEWEY, Wilhelm G. **Hydrogeology**. Springer, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Resolução Conjunta IBAMA/SEMA/IAP nº005, de 28 de março de 2008. Define critérios para avaliação das áreas úmidas e seus entornos protetivos, normaliza sua conservação e estabelece condicionantes para o licenciamento das atividades nelas permissíveis no Estado do Paraná. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESO_LUCOES/RESOLUCAO_CONJUNTA_IBAMA_SEMA_IAP_005_2008.pdf>. Acessado em: 16 de junho 2021.

IRITANI, Mara Akie; EZAKI, Sibebe. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. In: **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 2008. p. 104-104.

JUNK, Wolfgang Johannes; PIEDADE, Maria Tereza Fernandez. Áreas Úmidas (AUs) brasileiras: avanços e conquistas recentes. **Boletim da Associação Brasileira de Limnologia**, v. 41, n. 2, p. 20-24, 2015.

JUNK, Wolfgang J. et al. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences**, v. 106, n. 1, p. 110-127, 1989.

JUNK, Wolfgang J. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. Springer Science & Business Media, 2010a.

JUNK, Wolfgang J. et al. Ecophysiology, biodiversity and sustainable management of central Amazonian floodplain forests: A synthesis. In: **Amazonian floodplain forests**. Springer, Dordrecht, 2010b. p. 511-540.

KARMANN, Ivo. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. **Decifrando a terra**, v. 2, p. 191-214, 2000.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **An introduction to geophysical exploration**. John Wiley & Sons, 2002.

KNÖDEL, Klaus; LANGE, Gerhard; VOIGT, Hans-Jürgen. **Environmental geology: handbook of field methods and case studies**. Springer Science & Business Media, 2008.

LOKE, M. H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A Practical Guide to 2D & 3D Electrical Imaging Surveys. **Technical Reports**, 2000.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

MCNEILL, John Duncan. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. 1980.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná: Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 15. 2007.

MILANI, Edison José. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. **Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, CDR**, p. 265-291, 2004.

MITSCHE, W.J., GOSSELINK, J.G. Wetlands: Characteristics and Boundaries. **National Research Council -NRC**, v. 5, 306p, 2015.

MONTANHEIRO, Filipe; CHANG, Hung Kiang; GASTMANS, Didier. Estudo hidroquímico do sistema aquífero tubarão (SAT) no município de Americana, SP. **Revista do Instituto Geológico**, v. 35, n. 1, p. 31-45, 2014.

MUSSETT, Alan E.; KHAN, M. Aftab. **Looking into the earth: an introduction to geological geophysics**. Cambridge University Press, 2000.

ODA, Geraldo Hideo et al. Geometria do Aquífero Tubarão entre os municípios de Indaiatuba e Capivari (SP). **Revista do Instituto Geológico**, v. 33, n. 1, p. 23-40, 2012.

ORELLANA, Ernesto. **Prospección geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972.

PERINOTTO, J. A. J. & ZAINÉ, J. E. Coluna Estratigráfica da Região de Rio Claro. 2008.

PERINOTTO, José Alexandre de Jesus et al. Diques clásticos na Formação Corumbataí (P) no nordeste da Bacia do Paraná, SP: Análise sistemática e significações estratigráficas, sedimentológicas e tectônicas. **Geociências**, p. 469-491, 2008.

PETRI, S.; FULFARO, V. J. Geologia do Brasil (Fanerozóico)-São Paulo: TA Queiroz-Ed. da Universidade de São Paulo. 1983.

PIEIDADE, Maria Teresa Fernandez et al. As áreas úmidas no âmbito do Código Florestal brasileiro. **Código Florestal e a ciência: o que nossos legisladores ainda precisam saber. Sumários executivos de estudos científicos sobre impactos do projeto de Código Florestal**, p. 9-17, 2012.

ROBINSON, Edwin S. Basic exploration geophysics. 1988.

ROCHA, Gerônimo et al. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, 2006.

ROSOLEN, Vania; DE OLIVEIRA, Diego Alves; BUENO, Guilherme Taitson. Vereda and Murundu wetlands and changes in Brazilian environmental laws: challenges to conservation. **Wetlands ecology and management**, v. 23, n. 2, p. 285-292, 2015.

ROSOLEN, Vania et al. On the link between soil hydromorphy and geomorphological development in the Cerrado (Brazil) wetlands. **Catena**, v. 176, p. 197-208, 2019.

ROSSI, M. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. **São Paulo: Instituto Florestal**, v. 1, p. 118, 2017.

SCHNEIDER, RiL et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: **Congresso brasileiro de Geologia**. 1974. p. 41-65.

SHERIFF, R. E. **Geophysical Methods**. Prentice Hall, 1989.

SOUSA, Rodrigo Vitor Barbosa; CELLIGOI, André. Monitoramento hidrogeológico como ferramenta de avaliação à degradação dos recursos hídricos: estudo realizado no aterro controlado de Londrina–PR. **GEOGRAFIA (Londrina)**, v. 18, n. 1, p. 45-63, 2009.

TELFORD, William Murray et al. **Applied geophysics**. Cambridge university press, 1990.