

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Geologia

**IDENTIFICAÇÃO DE CAVIDADES NATURAIS POR MEIO DE
ELETORRESISTIVIDADE NA REGIÃO DE SÃO PEDRO (SP)**

Isabela Tomazela Franzini

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2015

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

Isabela Tomazela Franzini

Identificação de Cavidades Naturais por Meio de
Eletrorresistividade na Região de São Pedro (SP)

Monografia de Trabalho de Conclusão de
Curso apresentada ao Instituto de Geociências
e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Rio Claro - SP

2015

Isabela Tomazela Franzini

Identificação de cavidades naturais por meio de eletrorresistividade na região de São Pedro (SP)

Monografia de Trabalho de Conclusão de
Curso ao Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Comissão Examinadora:

César Augusto Moreira (orientador)

Fábio Braz Machado

Antonio Celso de Oliveira Braga

Rio Claro, 30 de Março de 2015.

Assinatura da aluna

Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força e saúde para superar as dificuldades até concluir mais esta etapa da minha vida. Sinto-me honrada de poder ter as possibilidades que tive e acredito que nada acontece sem a vontade do Senhor.

Agradeço aos meus pais por acreditarem em mim desde o início, investindo e me apoiando e sempre me desejando o melhor. Sem o apoio familiar, eu com certeza não chegaria onde cheguei.

Agradeço ao meu namorado, Paulo, que sempre foi uma pessoa maravilhosa e paciente e que me ajudou sempre que precisei. Ele me ensinou a ser mais confiante e isso garantiu o meu sucesso em vários momentos. Obrigada de coração.

Agradeço ao meu orientador, César Augusto Moreira, pelo suporte, correções, incentivos e pela amizade. Foi ótimo trabalhar com uma pessoa tão aberta e que te inspira a sempre dar o melhor de si.

Quero agradecer aos meus amigos que deixaram tudo mais leve e divertido. Devo vários momentos agradáveis aos colegas de turma do Álcool'n Geo. Agradeço em particular a alguns amigos mais próximos, como Leonardo (Bussa); Elisa (Maroca); Ariane; Thaís (Fofa); Regiane; Cibele, Amine e Igor (primo), vocês provaram ser amigos de verdade e me apoiaram de formas diversas neste trabalho em particular. Podem ter certeza que encontrarão aqui um pouquinho de cada um de vocês.

Agradeço ao corpo docente, em especial aos professores Artur, Guillermo, Washington e Cerri que acreditaram no meu potencial e proporcionaram oportunidades para meu crescimento profissional. À administração e técnicos dos Departamentos de Petrologia e Metalogenia, e Geologia Aplicada que me ajudaram durante este trabalho e também durante meu estágio. São pessoas que fizeram toda diferença na minha formação.

A todos que participaram da minha vida e do meu desenvolvimento como pessoa, meu muito obrigada.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO	13
3.1 Localização e histórico da área.....	14
4. GEOLOGIA	19
4.1 Geologia Regional	19
4.2 Geologia Local.....	20
4.3 Aspectos Fisiográficos.....	22
4.4 Geomorfologia.....	23
4.5 Solos	24
5. PROCESSOS EROSIVOS	25
6. GEOFÍSICA	27
6.1 Conceitos do Método da Eletorresistividade.....	27
6.2 Arranjos de Desenvolvimento e Técnicas	30
6.3 Aplicações de Geofísica na Detecção de Cavidades	32
7. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS	34
7.1 Aquisição de Dados	34
7.2 Processamento de dados geofísicos	37
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
9. CONCLUSÃO.....	44
BIBLIOGRAFIA	45

Índice de ilustrações

Figura 1: Região de estudos, com realce para a área de levantamento geofísico (linha vermelha). Fonte: Adaptado de Google Earth (2014).	14
Figura 2: Início da ocupação urbana no local e sua relação com a erosão ao longo dos anos. Fonte: ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> (2004).	15
Figura 3: Detalhes da voçoroca já bem desenvolvida. a) Contato entre solo e arenito Pirambóia, marcado pela linha pontilhada; b) Profundidade da voçoroca estimada em 60 metros; c) Medidas inadequadas para o controle do processo foram tomadas. Por razão disto, a erosão passa a ser acelerada. Fonte: ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> (2004).	16
Figura 4: Evidências de riscos geológicos eminentes por ação descontrolada de processos erosivos. a) Rompimento de um trecho da vicinal que liga São Pedro/Charqueada; b) A erosão progrediu de maneira muito intensa, até as adjacências das moradias próximas à cabeceira; c) Dique de terra, destacado pelo círculo amarelo, construído pela Prefeitura a fim de ligar os bairros. Fonte: ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> (2004).	17
Figura 5: Medidas tomadas pela prefeitura a fim de conter o problema. a) Dique rompido; b) Tentativa de contenção pelo despejo de resíduos. Fonte: ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> , 2004; c) Situação atual da voçoroca.	18
Figura 6: Detalhe da linha de pedras localizada no contato solo/rocha.	20
Figura 7: Um dos <i>pipes</i> encontrados no local com aproximadamente 1m de altura e 0,3m de profundidade.	21
Figura 8: Parede da voçoroca evidenciando contato solo/rocha marcado pela linha tracejada. Próximo ao contato é possível visualizar as cavidades geradas graças ao fluxo interno de água.	21
Figura 9: Tabela das variações de temperaturas anuais e gráfico das médias mensais. Fonte: Modificado de CEPAGRI, 2014.	22
Figura 10: Gráfico pluviométrico do município de São Pedro. Fonte: Modificado de CEPAGRI, 2014.	23
Figura 11: Esquema de encosta apresentando ravinas e voçorocas. Fonte: Modificado de TEIXEIRA, W. <i>et al.</i> 2009.	25
Figura 12: Esquema de disposição de eletrodos e representação de linhas de corrente e equipotenciais. Fonte: Adaptado de Knödel <i>et al.</i> , 2007.	29

Figura 13: Montagem da linha geofísica a 15m à montante das cavidades. Localização da linha geofísica e <i>pipes</i>	34
Figura 14: Detalhe da linha. Eletrodos fincados no solo com espaçamento de 1m.....	35
Figura 15: Equipamento Terrameter LS. Fonte: ABEM INSTRUMENT AB, 2012....	35
Figura 16: Definições de tempo do ciclo de medição de resistividade. Fonte: ABEM INSTRUMENT AB, 2012.....	36
Figura 17: Pseudo seção geradas durante a aquisição de dados. Fonte: ABEM INSTRUMENT AB, 2012.....	36
Figura 18: Arranjo de modelo de dados e dados de referência da resistividade aparente. Fonte: GEOTOMO SOFTWARE, 2003.	37
Figura 19: Seções geofísicas para o arranjo Schlumberger. De cima para baixo: Pseudosseção; Seção calculada e Modelo de inversão.....	38
Figura 20: Seções geofísicas para o arranjo Wenner. De cima para baixo: Pseudosseção; Seção calculada e Modelo de inversão.....	39
Figura 21: Seções geofísicas para o arranjo Dipolo-dipolo. De cima para baixo: Pseudosseção; Seção calculada e Modelo de inversão.....	40
Figura 22: Efeito relativo <i>versus</i> profundidade analisada dos arranjos Wenner, Schlumberger e Dipolo-dipolo. Os arranjos Wenner e Schlumberger possuem um efeito relativo mais acentuado em profundidades menores em relação ao Dipolo-dipolo. Fonte: MILSOM, 2003.	41
Figura 23: Seções geofísicas e fotos do local onde a linha foi instalada e detalhe das cavidades. De cima para baixo temos os arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner....	42

RESUMO

Este trabalho tem como tema o estudo de cavidades naturais em voçorocas por meio de geofísica. A área de estudo localiza-se no município de São Pedro (SP) mais precisamente na voçoroca do Tucunzinho. O histórico da área mostra que desde a década de 60 já havia problemas com a alta taxa de erosão na voçoroca. Além do aumento da erosão, há o surgimento de cavidades em seu interior responsáveis por abatimentos, agravando a situação. Os métodos geofísicos têm sido aplicados com sucesso em estudos ambientais já que não são invasivos, são rápidos e custo relativamente baixo. Diante disso, o método escolhido para realização deste trabalho é o da Eletrorresistividade. A fim de compreender melhor o contexto da formação dos *pipes* com relação à geologia local, foram comparados três arranjos para o método da Eletrorresistividade, Schlumberger, Wenner e Dipolo-dipolo. Com isso foi possível determinar qual deles é o melhor para este tipo de estudo. De acordo com os dados obtidos em campo, o arranjo Schlumberger apresenta respostas mais condizentes em relação ao quadro erosivo analisado.

Palavras-chave: geofísica; eletrorresistividade; *piping*.

ABSTRACT

The scope of this work is the study of natural cavities in gullies through geophysics. The studied area is located in the city of São Pedro (SP) more precisely in the gully of Tucunzinho. The historic of the area shows that, since the 60s there were problems with the high rate of erosion in the gully. In addition to increased erosion, there is the appearance of cavities inside responsible for rebates, aggravating the situation. Geophysical methods have been successfully applied in environmental studies since they are noninvasive, are fast and relatively inexpensive. In order to better understand the context of formation of the pipes in relation to local geology, three arrangements were compared for the method of Electrical Resistivity, Schlumberger, Wenner and Dipole-dipole. Then, it was possible to determine which one is the best for this type of study. According to the data obtained in the field, the Schlumberger array presents more consistent results in relation to the erosive context analyzed.

Key-words: geophysics; electrical resistivity; *piping*.

1. INTRODUÇÃO

Os processos erosivos ocorrem constantemente devido às condições naturais do meio e podem ser aceleradas/induzidas pelas atividades antrópicas. Por mais que estes processos sejam naturais, eles ainda podem oferecer riscos tanto para o homem quanto para o ambiente quando estão fora de controle e em estágio avançado.

Um dos fatores antrópicos que induz à erosão acelerada, são as obras urbanas e viárias, atividades agropecuárias e agrícolas que podem propiciar a concentração das águas e influenciar no seu escoamento superficial. Isto acontece pela falta de permeabilidade que aumenta a quantidade e a velocidade das águas superficiais que atingem o solo.

Os fatores naturais que influenciam no processo de erosão são a litologia, podendo esta apresentar alta resistência ou não; o solo derivado das rochas, sendo que este pode conter diferentes índices de argila constituindo-se em um solo mais coeso ou mais friável; e ainda a tectônica que envolve a área, responsável pelo controle de feições lineares como falhas, fraturas que também influenciam no padrão das redes de drenagens.

O aumento populacional de uma região induz a ocupação desordenada, com consequentes desmatamentos que colaboram para que os processos erosivos aconteçam de forma mais acentuada. Infelizmente, são maioria os casos onde não há um estudo preliminar da área a ser ocupada com vista à segurança dos habitantes e ao equilíbrio das taxas de erosão. Com isso tem-se graves consequências como escorregamentos; formação de ravinas e voçorocas; abatimentos, entre outros.

Diante de tais preocupações, os estudos geoambientais ganham destaque nas mais diversas áreas do conhecimento, por meio dos mais variados métodos investigativos a fim de propor soluções e respostas.

A Geofísica é uma ciência que estuda os fenômenos físicos que ocorrem na Terra. Suas investigações indiretas, geralmente em superfície, nos permitem estudar a subsuperfície do terreno. As medidas obtidas respondem a determinada propriedade física no meio e a eficácia do levantamento está nos contrastes entre os valores obtidos.

Os métodos geofísicos têm sido aplicados com sucesso em estudos ambientais e cada vez mais aperfeiçoados com o avanço da ciência. As investigações em profundidade vêm sendo realizadas pela Geofísica com baixo custo e com tempo relativamente curto. Os

métodos geofísicos mais comumente usados para os estudos ambientais são os sísmicos; elétricos; GPR (*Ground Penetration Radar*); perfilagem de poços e potencial espontâneo.

Diante do exposto, a área de estudos, que compreende a voçoroca do córrego Tucunzinho, localizada no município de São Pedro, interior do Estado de São Paulo, foi selecionada devido a presença de uma voçoroca ativa, de fácil acesso, que já foi estudada anteriormente por vários autores (SANCHEZ, 1971; ALMEIDA FILHO *et al.*, 2004; MATHIAS, 2011; VALEZIO & PEREZ FILHO, 2012).

O histórico da área de estudos mostra que desde a década de 60, já havia um problema com a alta taxa de erosão da voçoroca. A contínua ocupação indevida dos moradores e o desmatamento acelerou o processo que mostrou ser crítico em meados de 1995 quando a voçoroca começou atingir as moradias. Medidas tomadas pela Prefeitura local não solucionaram o problema ainda (ALMEIDA FILHO *et al.*, 2004). Atualmente a voçoroca recebe o descarte de lixo e entulho de maneira ilegal.

Este trabalho tem como tema o estudo de cavidades naturais no desenvolvimento de voçorocas por meio do método da Eletrorresistividade com diferentes arranjos de aquisição de dados 2D.

2. OBJETIVOS

Tendo em vista a importância dos estudos geológicos e ambientais no meio urbano, este trabalho irá abordar técnicas de investigações para a detecção de cavidades naturais, conhecidas como *pipes*, que apresentam riscos à população.

Estas cavidades possuem diâmetros diversos, porém suas dimensões longitudinais são desconhecidas dado ao fato de não serem visíveis. As cavidades apresentam riscos de abatimento e consequente agravamento na desconfiguração da paisagem e, para melhor estudá-los, os métodos devem ser de natureza não invasiva que deverão evitar possíveis acidentes. A geofísica se encaixa neste quadro apresentando-se muito eficaz por não utilizar métodos invasivos e também por sua rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios.

O objetivo deste trabalho é identificar estas estruturas utilizando o método geofísico de Eletorresistividade e utilizar três arranjos (Schlumberger, Wenner e Dipolo-dipolo) para determinar qual o mais adequado para este tipo de estudo.

3. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

O presente trabalho é composto por quatro etapas: levantamento bibliográfico; coleta de dados de campo, tratamento de dados e interpretação e conclusão.

1ª Etapa – Levantamento Bibliográfico

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o histórico da área com foco no problema da erosão, a formação de *pipes* e geofísica, no qual foram coletadas informações sobre:

- A geologia do município de São Pedro;
- Os aspectos fisiográficos;
- O método geofísico a ser usado;
- Os processos responsáveis pelo desenvolvimento de voçorocas e formação de *pipes*.

A bibliografia utilizada encontra-se disponível na *internet* ou na biblioteca da própria Universidade. A bibliografia inclui artigos científicos, nacionais e internacionais, livros-texto, anais e apostilas.

2ª Etapa – Coleta de dados de campo

Inicialmente efetuou-se um reconhecimento de campo visando à programação dos trabalhos e posteriormente realizou-se os estudos e coletas de dados geológicos e geofísicos.

3ª Etapa – Tratamento de dados

Com as informações de campo coletadas e resultados do método geofísico, o *software RES2DINV* foi utilizado para processar os valores da resistividade aparente e confeccionar seções geoeletricas.

4ª Etapa – Interpretação e conclusão

Através da geofísica, será possível determinar os *pipes* bem como sua continuidade, dimensão e, também, estimar as áreas-problema para a formação de tais cavidades e relacionar à possíveis acontecimentos geológicos que colaboram para este processo.

3.1 Localização e histórico da área

A área de estudo (Figura 1) está localizada no município de São Pedro, interior do Estado de São Paulo, distante 191 km da capital. A área pode ser acessada, tendo ponto de partida em São Paulo, pela Rodovia dos Bandeirantes, SP-348, e posteriormente pelas SP-135 e SP-304. O município de São Pedro está localizado próximo a importantes centros administrativos e comerciais regionais, como Piracicaba, São Carlos e Rio Claro. A partir de Rio Claro, o acesso pode ser feito através da Rodovia Wilson Finardi, SP-191.



Figura 1: Região de estudos, com realce para a área de levantamento geofísico (linha vermelha). Fonte: Adaptado de Google Earth (2014).

O trabalho de Sanchez (1971), afirma que a erosão na área pode ser agravada quando há o rompimento do equilíbrio natural e a pouca resistência dos terrenos, associados à Formação Botucatu e Pirambóia e sua evolução pedogenética, marcada pelos Neossolos Quartzarênicos.

Já Almeida Filho *et al.* (2004) afirma que a área é muito arenosa, friável, com elevada porosidade e índices de vazios, e baixos valores de coesão. Tais características favorecem a erosão superficial e interna na área.

O autor referido ainda apresenta um histórico desde a década de 60, mostrando através de fotos (Figura 2 a Figura 5) a evolução da erosão e sua relação direta com o urbanismo inadequado.

A foto mais antiga do local, datada de 1962, mostra a existência da voçoroca na área. Antigamente, as áreas próximas à voçoroca eram utilizadas para plantação de café, por isso, a vegetação nativa foi retirada. Em 1965 houve um aumento do loteamento na cabeceira da erosão e a implantação de uma vicinal, a jusante, que dá acesso à Charqueada. No ano de 1972, é possível observar um desenvolvimento maior da erosão no sentido do loteamento e da estrada vicinal, favorecida pelas ações antrópicas anteriores.

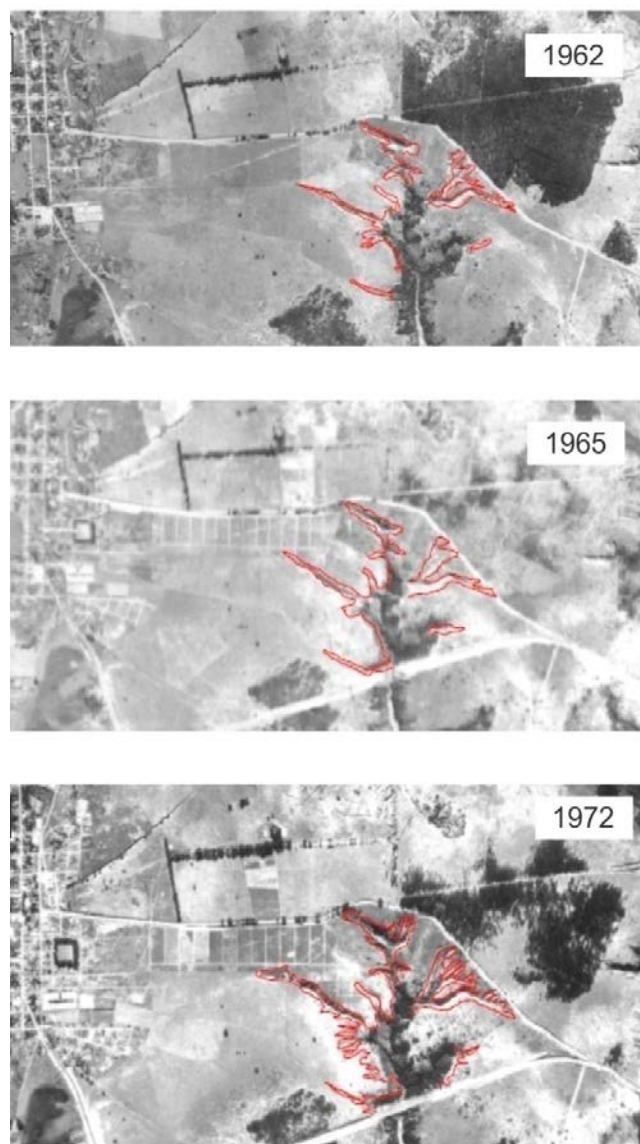


Figura 2: Início da ocupação urbana no local e sua relação com a erosão ao longo dos anos. Fonte: ALMEIDA FILHO *et al.* (2004).

Na década de 70, a voçoroca apresentava profundidade de 60m em que já era possível observar o contato solo/rocha (Figura 3a-b). Com o desenvolvimento acelerado da voçoroca, o município tomou algumas medidas a fim de conter o avanço do quadro erosivo (Figura 3c). Foram plantados eucaliptos nas paredes da voçoroca mas, não foi uma medida de sucesso já que as raízes pivotantes desta árvore colaboraram para a abertura de feições aonde a erosão era mais intensa, pois criavam caminhos preferenciais para o fluxo de água. Até hoje é possível encontrar alguns eucaliptos no local (ALMEIDA FILHO *et al.*, 2004).

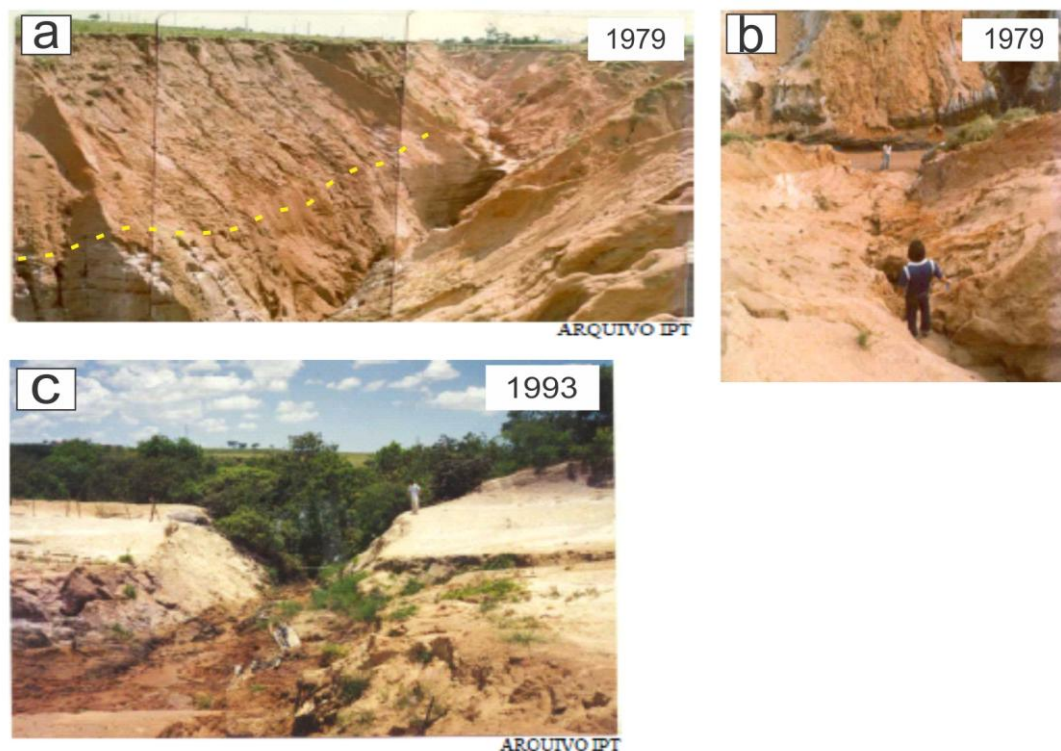


Figura 3: Detalhes da voçoroca já bem desenvolvida. a) Contato entre solo e arenito Pirambóia, marcado pela linha pontilhada; b) Profundidade da voçoroca estimada em 60 metros; c) Medidas inadequadas para o controle do processo foram tomadas. Por razão disto, a erosão passa a ser acelerada. Fonte: ALMEIDA FILHO *et al.* (2004).

Em 1995, um trecho da antiga vicinal foi rompida por conta da erosão pluvial ocasionada pelas chuvas (Figura 4a-b). Como a voçoroca representa um declive, todo escoamento superficial do município acaba direcionado à ela e canalizada sentido à vicinal. Esta foi construída com material do próprio local, muito arenoso, e obteve uma vida útil relativamente longa. Podemos supor a existência de tubulações para drenagem da água que preservaram-na por mais tempo.

Mais tarde, em 2002, um dique de terra foi construído dentro da voçoroca com a finalidade de fazer uma ligação entre bairros residenciais (Figura 4c). Muito provavelmente a terra utilizada na construção de tal dique foi retirada do próprio local, portanto seria um material muito arenoso, com alto índice de porosidade e pouco estável, não sendo indicado para cumprir com o pretendido. Com o mesmo fim da vicinal, o dique também foi rompido pela ação da erosão pluvial e fluvial (Figura 5a).



Figura 4: Evidências de riscos geológicos eminentes por ação descontrolada de processos erosivos. a) Rompimento de um trecho da vicinal que liga São Pedro/Charqueada; b) A erosão progrediu de maneira muito intensa, até as adjacências das moradias próximas à cabeceira; c) Dique de terra, destacado pelo círculo amarelo, construído pela Prefeitura a fim de ligar os bairros. Fonte: ALMEIDA FILHO *et al.* (2004).

Vendo que as medidas tomadas não obtiveram sucesso e sem um local para o descarte de lixo, a prefeitura decidiu utilizar a voçoroca como lixão, despejando entulhos e lixos domésticos (Figura 5b-c). Desde 2005 a prefeitura descarta entulho e lixo no local, sem qualquer controle sanitário ou fiscal. Devido ao livre acesso e proximidade com moradias, esta medida gerou o aparecimento de catadores de lixo no local, que dependem desta prática para sobrevivência.



Figura 5: Medidas tomadas pela prefeitura a fim de conter o problema. a) Dique rompido; b) Tentativa de contenção pelo despejo de resíduos. Fonte: ALMEIDA FILHO *et al.*, 2004; c) Situação atual da voçoroca.

Fica claro que as medidas tomadas não ajudaram a reverter o quadro, pois ele piorou com o tempo. O que antes era um problema do meio físico local, hoje atinge a sociedade com malefícios, em que há riscos geológicos que ameaçam os bairros adjacentes.

O trabalho de Mathias (2011) apresenta uma avaliação da frente erosiva e dos processos de sub-superfície relacionados à voçoroca em questão, aonde os *pipes* estão associados aos desabamentos que ocorrem no talude da voçoroca.

Já estudos por meio de fotointerpretação e do perfil longitudinal do canal fluvial, realizados por Valezio & Perez Filho (2012), comprova que o córrego Tucum busca um novo estágio de equilíbrio de suas variáveis. Tal constatação parte da análise de maiores quantidades de bancos detríticos no médio e baixo curso, atualmente, quando comparados ao período de 1962, data da foto aérea. Tudo indica que o avanço da malha urbana sobre a cabeceira do córrego Tucum orienta seus fluxos diretamente para os canais fluviais, originando sulcos, ravinas e voçorocas.

4. GEOLOGIA

4.1 *Geologia Regional*

A área está inserida na Bacia sedimentar do Paraná, sendo esta uma extensa depressão deposicional situada na parte centro-leste do continente sul-americano, cobrindo cerca de 1.400.000km². Além de estar presente em território brasileiro, também se encontra no Paraguai, Argentina e Uruguai. Em território nacional encontra-se nos Estados de Goiás, São Paulo, Mato Grosso, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul. Trata-se de uma bacia intracratônica simétrica preenchida com quase 5.000m de sedimentos paleozóicos, mesozóicos e lavas basálticas. Possui forma ovalada com eixo maior N-S, sendo seu contorno atual definido por limites erosivos relacionados em grande parte à história geotectônica meso-cenozóica do continente (MILANI *et al.*, 2007). O nome da Bacia é dado pelo rio Paraná, que corre paralelo ao seu eixo maior.

A Bacia do Paraná é constituída pelos seguintes Grupos: Rio Ivaí; Paraná; Itararé; Guatá; Passa Dois; São Bento; Bauru e Caiuá. Milani (1997) reconheceu no registro estratigráfico da Bacia do Paraná seis unidades de ampla escala ou Supersequências, delimitadas por discordâncias no topo e na base. Tais sequência são: Sequência Ordovício-Siluriana, representada pelo Grupo Rio Ivaí; Sequência Devoniana, correspondendo ao Grupo Paraná; Sequência Carbonífera-Eotriássica (Gondwana I), abrangendo os Grupos Itararé, Guatá e Passa Dois; Sequência Meso a Neotriássica (Gondwana II), constituída pelas formações basais do Grupo São Bento; Sequência Jurássica-Eocretácea (Gondwana III), englobando a maior parte do Grupo São Bento e Sequência Neocretácea (Bauru), representada pelos grupos Caiuá e Bauru.

A área de estudo está inserida dentro da Supersequência Gondwana I, Formação Pirambóia, que apresenta um ciclo transgressivo-regressivo completo, iniciando na base com depósitos marinhos do Grupo Itararé sucedidos por sedimentos da Formação Rio Bonito. O término da transgressão se dá com o afogamento marinho materializado por um pacote pelítico que corresponde à Formação Palermo. A partir daí a tendência regressiva começa a ser evidenciada. Este evento foi ocasionado por rearranjos tectônicos que mais tarde, no final do Permiano e com uma continentalização mais pronunciada, desenvolveram os campos de dunas eólicas correspondentes à Formação Pirambóia (DIAS, 2006).

A Formação Pirambóia aflora especialmente na porção nordeste da bacia, nos estados de São Paulo e Paraná, mas tem ampla área de ocorrência. Sua espessura é muito variável, podendo atingir alguns poucos metros no estado do Paraná e mais de 400m em subsuperfície nos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul (ASSINE *et al.*, 2004). De idade Triássica e constituída de arenitos com intercalações de argilitos e siltitos, apresenta estruturas como estratificações cruzadas, planares, acanaladas e plano-paralela. Trata-se de um ambiente continental-fluvial com alguma influência eólica no topo. O conteúdo fossilífero da Fm. Pirambóia consiste em conchóstracos, ostracodes e restos vegetais (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

4.2 Geologia Local

Durante a etapa de campo, foi feita a descrição geológica do local de estudo. A área é marcada por relevo acidentado que contém a presença de sulcos, topos angulares e vales estreitos. O perfil de solo possui aproximadamente 2m, com coloração avermelhada e é muito arenoso, sendo cerca de 75% composto por grãos de quartzo.

O contato solo/rocha é marcado por linhas de pedras (Figura 6) e pelo aparecimento dos *pipes* (Figura 7). Estas cavidades variam de 0,5m a 1,5m de altura e profundidades que variam entre 0,2m a 0,5m (Figura 8).



Figura 6: Detalhe da linha de pedras localizada no contato solo/rocha.



Figura 7: Um dos *pipes* encontrados no local com aproximadamente 1m de altura e 0,3m de profundidade.



Figura 8: Parede da voçoroca evidenciando contato solo/rocha marcado pela linha tracejada. Próximo ao contato é possível visualizar as cavidades geradas graças ao fluxo interno de água.

A rocha em questão são arenitos da Formação Pirambóia. Estes possuem coloração rósea clara, são friáveis, com granulometria predominantemente médio superior que varia a médio inferior, com grãos arredondados, bem selecionados e possuem matriz fina, composta por argilominerais. Não foi presenciado estruturas sedimentares no local.

4.3 Aspectos Fisiográficos

A área está contida no domínio fisiográfico Depressão Periférica Paulista, próximo ao contato com o Planalto Ocidental. Em termos hidrológicos, a área compreende o Córrego Tucunzinho, afluente do Ribeirão Araquá, tributário da bacia do rio Piracicaba, um dos principais canais de drenagem da Bacia do Paraná.

De acordo com a classificação climática de Koeppen, o clima no município é o Aw, tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18°C (Figura 9). O mês mais seco tem precipitação inferior a 60mm e com período chuvoso que se atrasa para o outono (CEPAGRI, 2014).

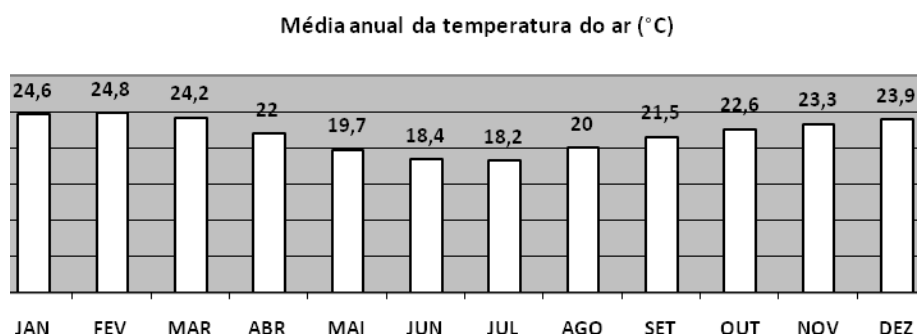


Figura 9: Tabela das variações de temperaturas anuais e gráfico das médias mensais. Fonte: Modificado de CEPAGRI, 2014.

Fatores climáticos influenciam diretamente nos processos erosivos, já que em um período mais chuvoso, temos o solo saturado com baixa capacidade de infiltração que favorece o escoamento superficial e dificulta a infiltração. As águas da chuva são infiltradas no solo até atingir o contato com o horizonte saprolítico. A partir daí, a água passa a escoar lateralmente no sentido do menor gradiente topográfico. No caso da área de estudo, temos uma presença constante de água dado ao Córrego do Tucum, que é intensificado nos momentos de chuva. Por conta do solo arenoso e elevado gradiente topográfico, a velocidade da infiltração e escoamento lateral é alto, e acaba por ocasionar perda de argilominerais por erosão interna. Com a diminuição dos argilominerais, o horizonte fica mais suscetível ao aparecimento de *pipes*.

Segundo informações que constam no site do CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura), o município de São Pedro apresenta seis meses chuvosos e seis meses de estiagem. Sua média anual de chuva corresponde a

1307,5mm sendo que apenas no mês de janeiro, responsável pela precipitação máxima, atinge 221,5mm (Figura 10).

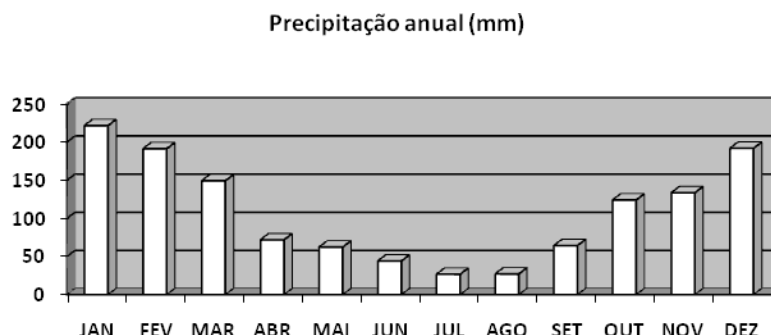


Figura 10: Gráfico pluviométrico do município de São Pedro. Fonte: Modificado de CEPAGRI, 2014.

A vegetação da área foi composta por mata latifoliada tropical, galeria ou ciliar, higrófila e formações campestre. Quase toda vegetação original foi retirada para o plantio de café, entre os séculos XIX e XX, e cana-de-açúcar, na metade do século passado (SANCHEZ, 1971).

4.4 Geomorfologia

O trabalho de Almeida (1964) classificou o relevo do estado de São Paulo em cinco províncias geomorfológicas: Planície Costeira, Planalto Atlântico, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental.

A unidade geomorfológica Depressão Periférica Paulista corresponde a uma região com sedimentos paleozóicos e recebe uma subdivisão de três zonas: Zona do Paranapanema, Zona do Mogi-Guaçu e Zona do Médio Tietê. A área de mapeamento está inserida na província da Depressão Periférica e na Zona do Médio Tietê.

Segundo Moraes Rego (1932), a Depressão Periférica possui área sensivelmente rebaixada pela erosão, entre as terras altas do Planalto Atlântico e as cristas, igualmente elevadas, das cuestas basálticas, com área de ocorrência em torno de 450km na direção N-S e 100km E-W.

A Zona do Médio Tietê compreende uma área de 15.200km² constituída predominantemente por sedimentos, mas também apresenta derrames e intrusões de rochas

basálticas que são responsáveis pela sua topografia mais saliente. A topografia se apresenta pouco acidentada, com desníveis locais que excepcionalmente ultrapassam 200m. Predominam colinas baixas, de formas suavizadas, separadas por vales jovens, sem planícies aluviais importantes, determinados pela intersecção dos perfis convexos das vertentes.

4.5 Solos

A área de estudo apresenta três tipos de solos descritos por Mathias (2011), são eles: Argissolos (solos podzólicos vermelho amarelo), Neossolos Quartzênico (areias quartzosas profundas) e Gleissolos. Os Argissolos estão relacionados à Formação Botucatu, possuem textura entre média e arenosa. Os Neossolos Quartzênicos estão relacionados a interflúvios avançando pelas médias vertentes de menos declividade. Já os Gleissolos são relacionados às várzeas e planícies aluviais do Córrego Tucum, sendo o Córrego Tucunzinho seu afluente.

Na região, os solos são pobres em nutrientes e com baixa retenção de água (OLIVEIRA, 1999).

Podemos concluir que os solos da região possuem uma tendência forte à erosão por serem bem arenosos.

5. PROCESSOS EROSIVOS

A erosão é um processo mecânico que age em superfície e profundidade, sob condições físicas e que pode ser acelerada pela ação catalisadora do homem. Traduz-se na desagregação, transporte e deposição de partículas do solo, subsolo e rocha em decomposição pelas águas, ventos ou geleiras. Quando classificada como acelerada, deve apresentar uma taxa de erosão maior que a taxa de erosão normal, muitas vezes resultando em desequilíbrio ambiental devido às atividades humanas (MAGALHÃES, 2001).

A erosão é classificada pelo agente atuante, que pode ser o vento, água ou geleira. No caso deste trabalho, trataremos da erosão hídrica em específico. A erosão hídrica ocorre de três formas principais: erosão laminar; ravinamentos; e sulcos ou voçorocas (Figura 11).

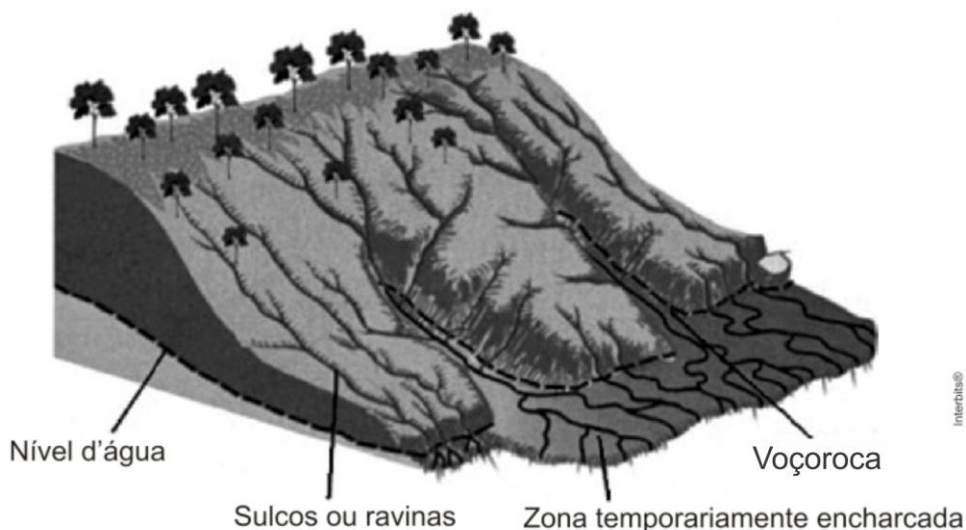


Figura 11: Esquema de encosta apresentando ravinas e voçorocas. Fonte: Modificado de TEIXEIRA, W. *et al.* 2009.

Suas particularidades são:

- A erosão laminar é caracterizada pela perda de uma capa de solo. A matéria orgânica e as argilas são as primeiras porções do solo a se desprenderem, sendo as partes mais ricas em termos de nutrientes para as plantas (MAGALHÃES, 2001).
- O ravinamento corresponde ao canal de escoamento pluvial concentrado, apresentando feições erosivas com traçado bem definido (MAGALHÃES, 2001). Pode ser visto como o início de um sistema de drenagem maior. Quando a precipitação excede a

capacidade de infiltração do solo, a água é acumulada em depressões até que começa a descer a encosta, que pode evoluir para ravina a medida em que o processo avança (GUERRA, 1997).

- Voçoroca é o estágio mais avançado de erosão acelerada correspondendo à passagem gradual do processo de ravinamento, até atingir o lençol freático. Consiste no desenvolvimento de canais no qual o fluxo superficial é concentrado, formado devido à variação da resistência à erosão causada, em geral, por mudanças na elevação ou declividade do terreno. Diversos processos estão presentes na voçoroca, dentre eles o escoamento pluvial (formação de sulcos), erosão interna do solo (*piping*), solapamentos e escorregamentos dos solos, além da erosão feita pela água do escoamento pluvial (BACCARO, 1994).

Quanto a gênese, as voçorocas podem ser classificadas: a) causadas por alterações hidrológicas nas bacias hidrográficas associadas a desmatamentos; ou b) originadas por concentração das águas superficiais. O primeiro grupo, relacionado ao desequilíbrio hidrológico, gera alterações no regime de vazão e cria condições para o surgimento do *piping* (IPT, 1991).

O processo, *piping* ou "entubamento", em português, tem seu início quando o fluxo interno d'água transporta as argilas que estão presentes no solo, em que estas servem de "cimento", deixando o solo mais vulnerável a ponto de ser possível o transporte de partículas maiores no próximo fluxo que o atingir. Quando isto acontece, cavidades, *pipes*, são formadas e cada vez mais as partículas são carregadas. O fenômeno é iniciado em condições de gradiente hidráulico crítico, ou seja, irá depender de acontecimentos esporádicos, como chuvas, por exemplo.

O *pipe* está relacionado às diferenças texturais de seqüências litoestratigráficas ou de horizontes pedológicos. O processo evolutivo de formas associadas ao *piping* origina sistema de cavernas e/ou dutos. Na área de saída do fluxo confinado temos a presença de "alcovas de regressão"¹, por estarem associadas à erosão remontante (CASSETI, 2005).

O fenômeno pode ocorrer também em casos de litologia impermeável, como os basaltos, responsáveis pelo armazenamento da água percolada, implicando fluxo de subsuperfície (CASSETI, 2005).

Os problemas que envolvem este processo erosivo ocorrem à medida que os canais vazios evoluem. Tais canais podem ser causadores de colapsos do terreno, desabamentos que

¹ Erosão por quedas d'água, ou em cascatas, que se origina a partir da água de escoamento superficial que desemboca no interior de incisões erosivas (MATHIAS, 2011 *apud* BIGARELA *et al.*, 1996)

aumentam ainda mais a voçoroca ou criam novos ramos. Durante os processos de erosão interna, ocorrem os descalçamentos e solapamentos da base das paredes da voçoroca, provocando desmoronamentos e escorregamentos de solos (IPT, 1991).

6. GEOFÍSICA

A geofísica é uma "ciência que se ocupa dos estudos das estruturas do interior da Terra e da localização de materiais delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, usando, para esta finalidade, medidas tomadas na superfície da terra ou da água, interior de furos de sondagens ou em levantamentos aéreos" (ORELLANA, 1972).

6.1 Conceitos do Método da Eletrorresistividade

Este capítulo será baseado na bibliografia de Figuerola (1974). Para compreensão do método, devemos entender duas leis fundamentais básicas:

- Lei da conservação da carga espacial:

$$\text{div} \vec{Y} = - \frac{\partial q}{\partial t}$$

- Lei de Ohm:

$$\vec{Y} = \sigma \vec{E}$$

Onde $\vec{Y}$ = densidade de corrente

q = densidade da carga espacial

t = tempo

σ = condutividade

$\vec{E}$ = vetor do campo elétrico, definido como gradiente do potencial elétrico V:

$$\vec{E} = -\text{grad } V$$

A lei de Ohm é válida somente em caso de corpos isótropos, já que em caso de um corpo anisótropo, a condutividade não poderia ser considerada como um escalar σ , e sim como um tensor simétrico de segunda ordem.

Considerando o caso do regime estacionário, a densidade de carga espacial será constante, e a lei da conservação da carga espacial se simplifica a:

$$\text{div } \vec{Y} = 0$$

Fazendo uso das leis fundamentais para regime estacionário e corpos isotrópicos, temos:

$$\text{div } \vec{Y} = \text{div}(\sigma \vec{E}) = \sigma \text{div}(-\text{grad} V) = -\sigma \Delta V = 0$$

Que resulta em:

$$\Delta V = 0$$

que nada mais é que a equação de Laplace.

Vamos agora aplicar ao estudo de um semiespaço formado por um terreno homogêneo e isotrópico, em cuja superfície supomos haver uma carga pontual (um eletrodo de corrente em um ponto considerado e o outro no infinito). Para ele aplicaremos a equação de Laplace em coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \varphi^2} = 0$$

Suponhamos que o potencial depende só da distância r ao eletrodo, em que a equação de Laplace reduz a:

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0$$

de cuja integração resulta:

$$V = A - \frac{B}{r}$$

Se adotarmos como potencial nulo o do infinito, em $r \rightarrow \infty$ resultará $A = 0$, como se vê:

$$V = -\frac{B}{r}$$

A densidade de corrente em uma direção qualquer y , a uma distância r , terá por módulo:

$$Y = -\sigma \frac{dV}{dr} = -\sigma \frac{B}{r^2}$$

Sendo a densidade da corrente a mesma em qualquer direção e , à mesma distância r do eletrodo, a corrente I que penetra pelo eletrodo será a mesma que a que atravessa uma semiesfera de raio r , então temos que:

$$I = 2\pi r^2 Y = 2\pi r^2 \left(-\sigma \frac{B}{r^2} \right) = -2\pi \sigma B$$

$$e B = -\frac{1}{2\pi \sigma} = -\frac{I \rho}{2\pi}$$

Portanto, temos que o potencial devido a um eletrodo, a uma distância r deste é:

$$V = \frac{I \rho}{2\pi} \frac{1}{r}$$

O método permite o estudo de formações sub-horizontais e também subverticais, como falhas, a uma profundidade consideravelmente profunda (FIGUEROLA, 1974).

Seu funcionamento consiste no envio de corrente elétrica ao terreno mediante a eletrodos que são cravados no solo (C_1 e C_2) e uma vez estabelecido assim um campo elétrico artificial, é investigado suas condições com outros dois eletrodos adicionais também cravados no terreno (P_1 e P_2) e cujas distâncias variam com o decorrer das leituras (Figura 12) (KNÖDEL *et al.*, 2007).

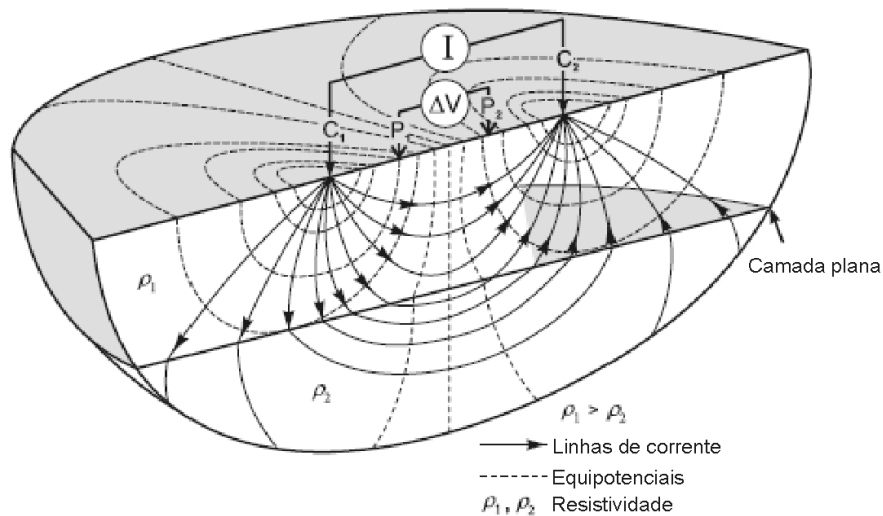


Figura 12: Esquema de disposição de eletrodos e representação de linhas de corrente e equipotenciais. Fonte: Adaptado de Knödel *et al.*, 2007.

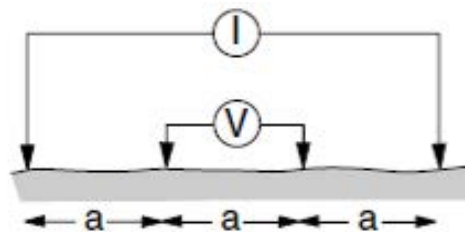
Desta forma é possível determinar a resistividade aparente do terreno em função da diferença de potencial medida entre os eletrodos e a intensidade da corrente que foi aplicada. O resultado são informações quantitativas das propriedades condutoras do subsolo.

6.2 Arranjos de Desenvolvimento e Técnicas

Há diversos tipos de arranjos para os eletrodos de corrente potencial. Os mais usados são: Dipolo-dipolo, Schlumberger e Wenner, onde todos serão usados neste trabalho a fim de obter uma boa resolução, otimizar o sinal, minimizar os ruídos presentes e, principalmente, comparar os arranjos entre si para saber qual o ideal para a detecção de cavidades.

Este subcapítulo será escrito com base na teoria de Figuerola (1972) e ilustrações de Milsom (2003).

O arranjo Wenner utiliza o sistema de eletrodos alinhados e simétricos, em que temos:



a = espaçamento constante dos eletrodos

Este arranjo requer a movimentação de todos os eletrodos a cada medida.

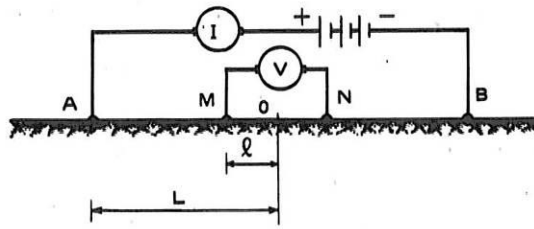
A função de k resulta em:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a}\right) - \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a}\right)} = 2\pi a$$

Uma desvantagem do arranjo Wenner está na necessidade de mover os quatro eletrodos a cada medida realizada, isto implica num maior número de pessoas que deverão auxiliar na aquisição de dados, maior chance de erro durante a montagem dos eletrodos, menor produtividade, maior custo e por fim, grandes distâncias a serem percorridas (ORELLANA, 1972).

Este arranjo oferece bons resultados no mapeamento de estruturas horizontais, além da alta razão sinal/ruído que fornece.

No arranjo Schlumberger, os eletrodos de leitura são situados a uma mesma distância "l" do ponto de estação "O". Os eletrodos de corrente também são distanciados simetricamente a uma distância "L", porém esta varia de acordo com as medições.



Sendo assim, a fórmula final para k resulta em:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{L-l} - \frac{1}{L+l}\right) - \left(\frac{1}{L+l} - \frac{1}{L-l}\right)} = \frac{\pi L^2 - l^2}{2l}$$

Ao aumentar a distância entre os eletrodos AB, as investigações das camadas aumentam com profundidade. As leituras para este arranjo estão menos sujeitas a uma variação lateral no parâmetro físico, irregularidades na topografia e a ruídos providos de fontes artificiais. Resultado disso são leituras de maior precisão que possibilitam uma interpretação coerente e mais próxima da realidade (BRAGA, 2007).

O arranjo dipolo-dipolo consiste em eletrodos dispostos em linha com espaçamento fixo durante todo o levantamento, onde cada afastamento entre os pares representa mais um nível de profundidade investigado. Tanto o espaçamento dos eletrodos quanto o número destes utilizados, regulam a profundidade das investigações atingidas.



Para este arranjo, a fórmula final para k é dada por:

$$k_{ax} = \frac{\pi r^3}{Ll}$$

Este arranjo apresenta boa resolução lateral e a sua principal vantagem é a simetria. Como resultado disto, o posicionamento correto de uma anomalia torna-se mais fácil. Outra vantagem, em termos práticos, é a facilidade operacional em campo. A principal desvantagem do dipolo-dipolo é a sua baixa razão sinal/ruído (GANDOLFO & GALLAS, 2007).

6.3 Aplicações de Geofísica na Detecção de Cavidades

O trabalho de Dourado *et al.* (2001), realizado em Descalvado - SP, teve como objetivo o uso de métodos geofísicos para a detecção de cavidades naturais na Formação Pirambóia. Estas cavidades já eram responsáveis por uma série de desmoronamentos na área de estudo e sua origem está relacionada ao tipo de rocha, aos padrões estruturais presentes, ao fluxo interno de água e, principalmente, pelo rebaixamento do lençol freático, devido às operações de extração de areia. Os métodos utilizados pelos autores foram GPR, eletrorresistividade (arranjo dipolo-dipolo) e gravimetria. Os resultados da gravimetria mostraram baixos gravimétricos interpretados como ausência de massa, enquanto a eletrorresistividade apontou um aumento da resistividade nestes mesmos locais. No ensaio com o GPR, foi possível detectar cavidades por meio de feições hiperbólicas detectadas nos radargramas.

O trabalho de Ahmed *et al.* (2003), realizado na região centro-leste do estado de Illinois (EUA), explora a utilidade e precisão de medidas eletromagnéticas e de eletrorresistividade para mapear dolinas associadas a *pipes* no solo, que conectam hidraulicamente fraturas ativas na rocha matriz à superfície. Para as medidas de eletrorresistividade foram utilizados arranjos Schlumberger e Wenner. Inicialmente, as medidas de resistividade mencionadas foram utilizadas para detecção de cavidades em profundidade, e medidas eletromagnéticas foram utilizadas para identificar rapidamente áreas de condutividade anormalmente alta, onde seria esperado encontrar sumidouros preenchidos. Próximo a superfície, os resultados da eletrorresistividade indicaram a ocorrência de *pipes* no solo através dos altos valores da resistividade. Anomalias positivas de condutividade ocorrem ao longo ou próximo aos sumidouros preenchidos por água, estas anomalias foram interpretadas como *pipes* ativos preenchidos por água. Em seguida, foram utilizadas medidas de resistividade dipolo-dipolo de alta resolução, para obter imagens bidimensionais de subsuperfície na região das anomalias eletromagnéticas.

O trabalho de Silva Junior *et al.* (2006), utilizou os métodos de gravimetria, eletrorresistividade (arranjo dipolo-dipolo) e polarização induzida. O estudo, realizado em Almirante Tamandaré (PR) teve como objetivo avaliar a aplicabilidade dos métodos para uma região cárstica, além de fornecer subsídios para que órgãos públicos tomarem alguma providência, já que houve casos de abatimento do solo. A gravimetria mostrou baixos gravimétricos que foram interpretados como cobertura aluvionar e/ou cavidades/fraturas. A

eletrorresistividade e a polarização induzida tiveram como resultados um estrato geoeletrico de baixa resistividade e cargabilidade, sotoposto a níveis resistivos e de cargabilidade maiores, que interpretou-se como cavidades com presença de água desde níveis superficiais até profundidades de 15 a 20 metros. Ao final do trabalho foi possível detectar as cavidades e um padrão estrutural presente na área, sendo o único desafio a presença de ruídos por se tratar de um trabalho realizado no perímetro urbano.

7. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS

7.1 Aquisição de Dados

Para a realização deste trabalho, foi feito uma pesquisa bibliográfica para localização de áreas com ocorrência de *piping* e previamente estudada. Com isso foi possível definir a área mais próxima que apresenta as condições necessárias para o estudo. A partir daí foi possível fazer um levantamento bibliográfico sobre qual a melhor maneira de estudar o caso, onde a geofísica demonstrou eficiência; qual o melhor método, sendo a Eletrorresistividade o mais utilizado em estudos de casos; o histórico da área com foco no problema da erosão e a formação de *pipes*.

Foi realizada uma saída de campo para reconhecimento da área e localização das cavidades. Após localização das cavidades na área escolhida, foi medido a altura das ocorrências em relação a superfície, aproximadamente 2 metros, a fim de estimar o espaçamento dos eletrodos, definido em 1m (Figura 13) e comprimento da linha (Figura 14), definido em 83m. A linha também teve um recuo de 15 metros em relação ao início das cavidades, para melhor aquisição de dados e por razões de segurança. Além disso, foram coletadas informações geológicas locais para complementar e melhor interpretar os dados geofísicos.

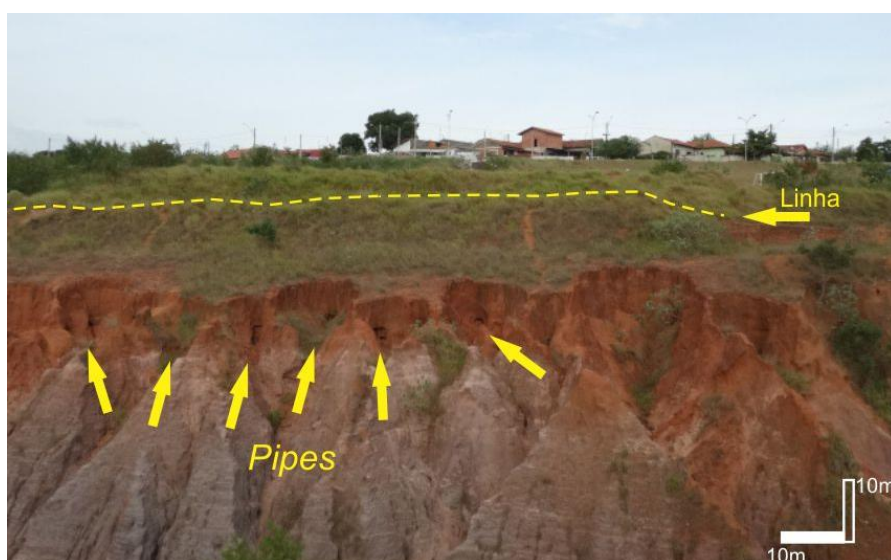


Figura 13: Montagem da linha geofísica a 15m à montante das cavidades. Localização da linha geofísica e *pipes*.



Figura 14: Detalhe da linha. Eletrodos fincados no solo com espaçamento de 1m.

O equipamento geofísico utilizado foi o ABEM Terrameter LS (Figura 15). É um sistema no estado da arte de aquisição de dados para potencial espontâneo (SP), resistividade (RES) e polarização induzida (IP). Possui 250W e pode operar com correntes de aproximadamente 2,5A.



Figura 15: Equipamento Terrameter LS. Fonte: ABEM INSTRUMENT AB, 2012.

O equipamento permite realizar medidas para arranjos convencionais como Wenner; Pólo-pólo; Dipolo-dipolo; Pólo-dipolo e Schlumberger, como também para arranjos não convencionais: equatorial dipolo-dipolo; superfície geral; tomografia; potencial e múltiplo gradiente.

No caso de medição de resistividade, o ciclo de medição consiste de um pulso positivo, seguido por um pulso duplo negativo e novamente um pulso positivo (Figura 16).

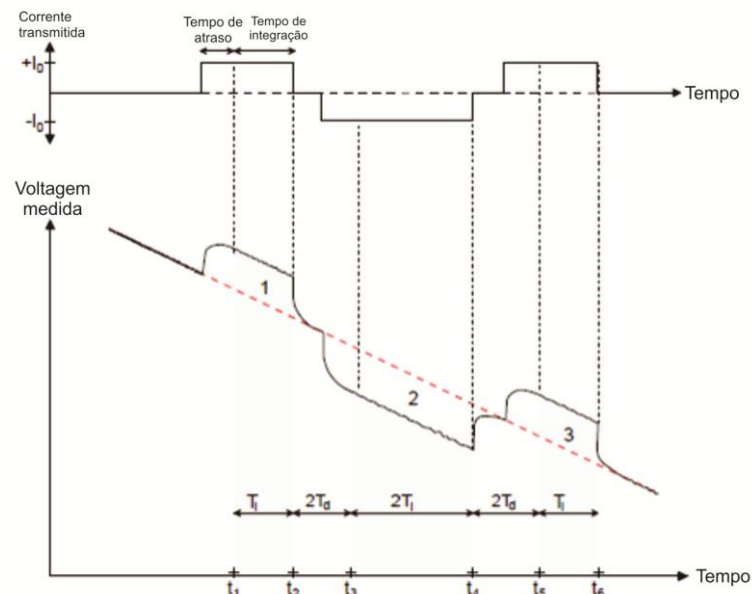


Figura 16: Definições de tempo do ciclo de medição de resistividade. Fonte: ABEM INSTRUMENT AB, 2012.

Os resultados são salvos na memória interna do equipamento, mas podem ser visualizados na forma de tabela numérica ou em pseudo seções em campo (Figura 17).

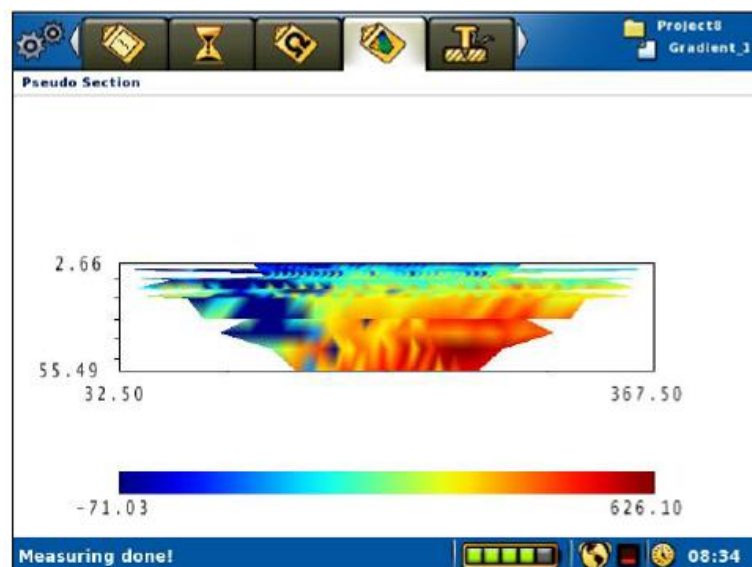


Figura 17: Pseudo seção geradas durante a aquisição de dados. Fonte: ABEM INSTRUMENT AB, 2012.

7.2 Processamento de dados geofísicos

O programa de computador utilizado para processar os dados foi o *RES2DINV*, que é capaz de gerar, automaticamente, um modelo bidimensional (2-D) de resistividade para a subsuperfície através dos dados elétricos obtidos durante os ensaios. O programa foi especificado para processar grande quantidade de dados, de 200 a 21000 pontos de dados, coletados por sistemas com grande quantidade de eletrodos, variando de 25 a 16000 eletrodos.

O modelo 2-D usado no programa de inversão, que consiste em vários blocos retangulares, é mostrado na Figura 18. O arranjo dos blocos está ligeiramente associada com a distribuição dos dados na pseudo-seção (GEOTOMO SOFTWARE, 2003).

A distribuição e tamanho dos blocos é gerada automaticamente pelo programa, usando a distribuição dos dados como um guia aproximado. A profundidade da linha inferior de blocos é ajustada para ser aproximadamente igual à profundidade equivalente de investigação dos dados com o maior espaçamento dos eletrodos. O levantamento geralmente é realizado com um sistema em que os eletrodos possuem um espaçamento constante entre eletrodos adjacentes. No entanto, o programa pode também trabalhar com conjuntos de dados em que eletrodos possuem espaçamento variado.

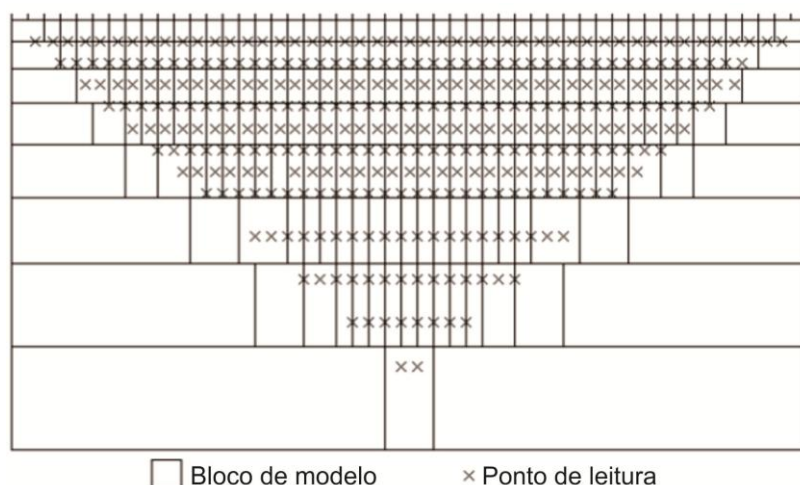


Figura 18: Arranjo de modelo de dados e dados de referência da resistividade aparente. Fonte: GEOTOMO SOFTWARE, 2003.

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados geofísicos são apresentados em pseudosseções, seções calculadas e modelos de inversão. As seções são apresentadas em termos de distância (eixo X) e profundidade (eixo Y), em metros, com variações de valores, representados por uma escala de cor em que cores quentes significam alta resistividade e cores frias baixa resistividade. As seções foram processadas individualmente e posteriormente foi definido um intervalo único de valores para os três arranjos. A topografia do local de ensaio geofísico é plana, dispensando correções topográficas por parte do programa.

A seção geofísica do arranjo Schlumberger possui altos valores de resistividade em sua porção mais profunda, a partir de 5,5 metros de profundidade, ultrapassando o valor de $161.847\Omega.m$ (Figura 19).

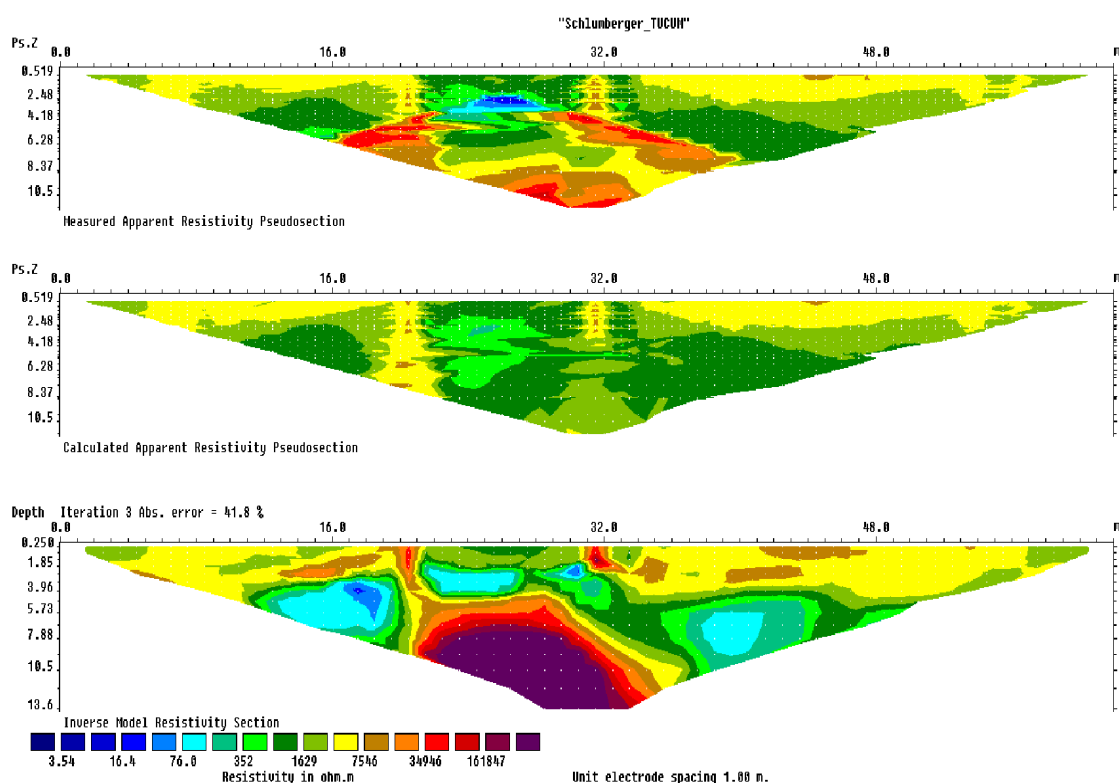


Figura 19: Seções geofísicas para o arranjo Schlumberger. De cima para baixo: Pseudosseção; Seção calculada e Modelo de inversão.

A seção do arranjo Wenner possui altos valores de resistividade em sua porção superior, atingindo até 5,5 metros de profundidade aproximadamente, com o valor de

34.946 Ω .m (Figura 20). Os valores da resistividade que predominam na seção variam de 1.629 Ω .m a 7.546 Ω .m sendo, portanto, medianos a altos e encontrados por toda a seção. As zonas anômalas, com baixa resistividade, estão próximas à região de máximos valores de resistividade e possuem forma arredondada. Ocorrem a partir dos 2 metros de profundidade e se encerram próximo aos 8 metros. Possuem valores que variam de 3,54 Ω .m a 76 Ω .m.

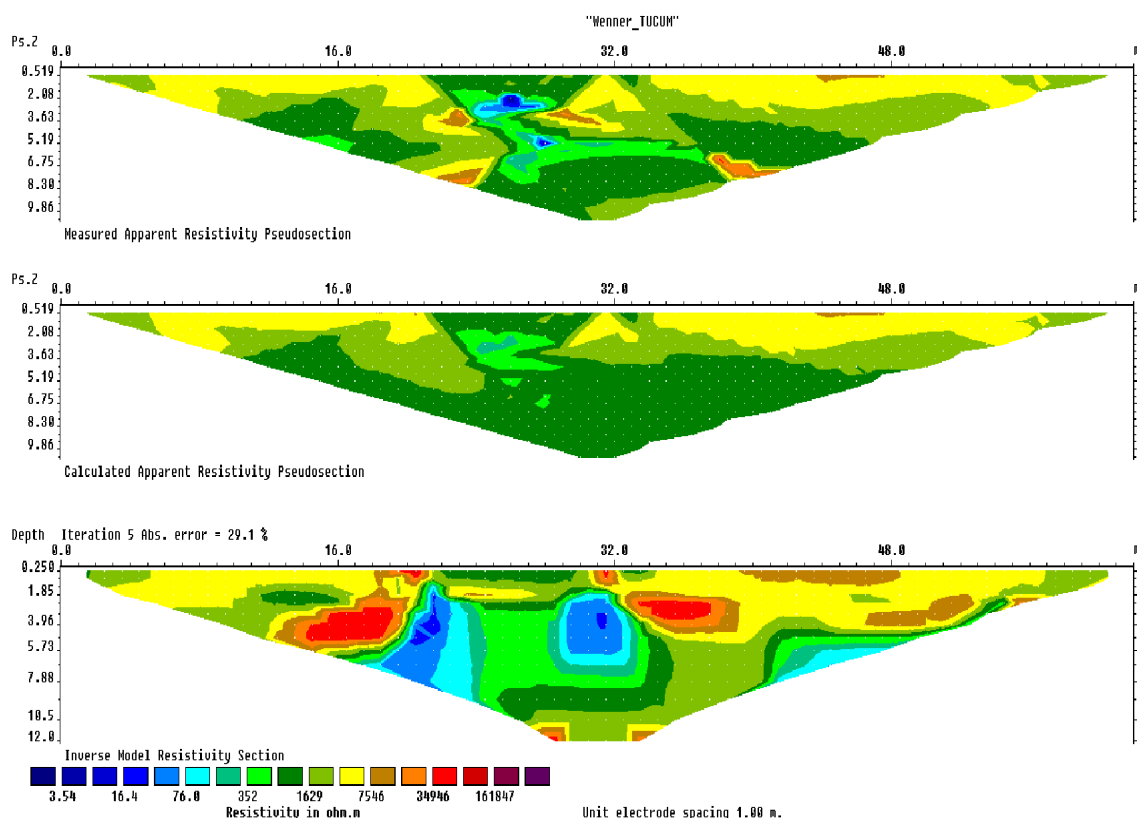


Figura 20: Seções geofísicas para o arranjo Wenner. De cima para baixo: Pseudosseção; Seção calculada e Modelo de inversão.

A seção geofísica do arranjo Dipolo-dipolo possui altos valores de resistividade, que ultrapassa o valor de 161.847 Ω .m, a partir de 3 metros de profundidade e identificado por uma grande zona arredondada (Figura 21). Os valores predominantes na seção variam de 352 Ω .m a 34.946 Ω .m, porém tendem a aumentar a medida que a profundidade aumenta. É possível ver que a partir dos 4 metros há uma mudança na resistividade em que os valores tendem a ser mais altos. As três zonas anômalas, com baixa resistividade, estão próximas à região de máximos valores de resistividade e possuem formato arredondado. Ocorrem a partir de 2,5 metros de profundidade e encerram próximo aos 6 metros. Os valores variam de 16,4 Ω .m a 352 Ω .m.

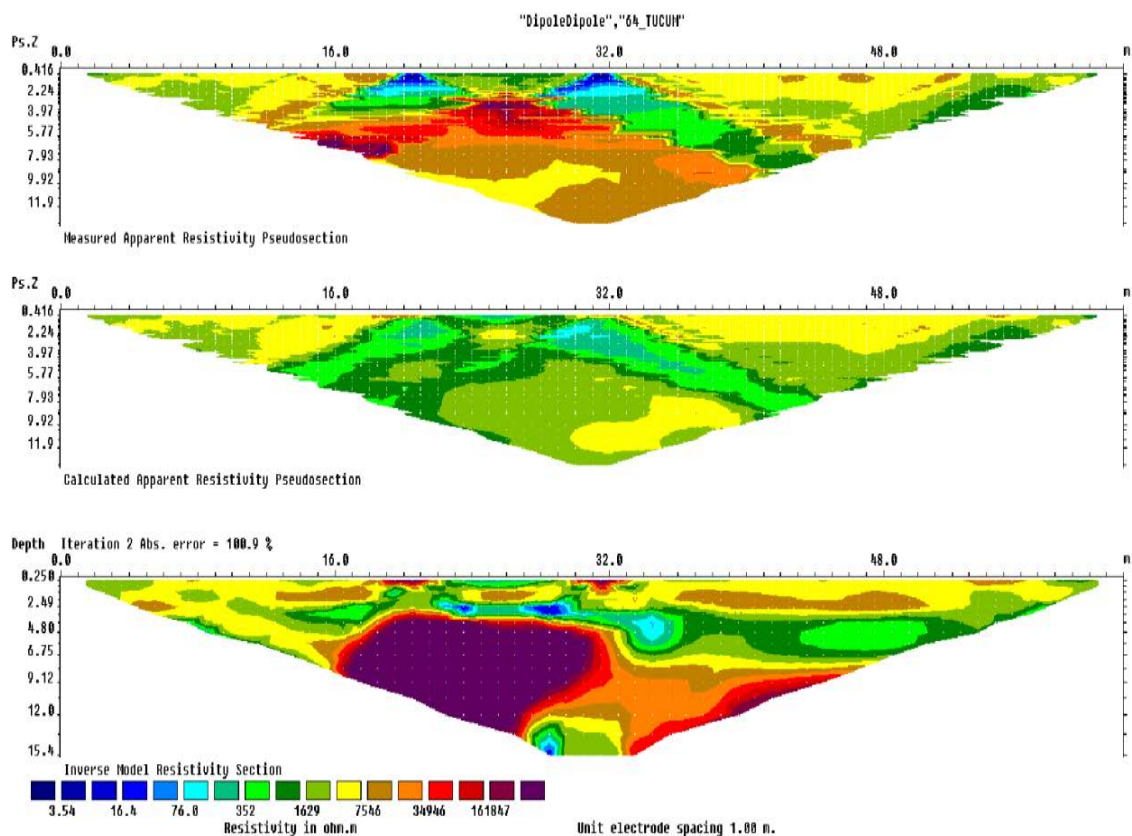


Figura 21: Seções geofísicas para o arranjo Dipolo-dipolo. De cima para baixo: Pseudosseção; Seção calculada e Modelo de inversão.

Os três arranjos atingem profundidades distintas devido à geometria de cada um, sendo o mais profundo o arranjo Dipolo-Dipolo, seguido por Schlumberger e Wenner. Quanto mais espaçados os eletrodos de potencial estão em relação aos eletrodos de corrente, maior será a profundidade que o arranjo irá atingir. Entretanto, o nível do sinal será menor próximo à superfície, como é o caso do arranjo Dipolo-dipolo. Se tivermos os eletrodos de potencial próximos aos eletrodos de corrente, então o nível do sinal será maior próximo à superfície e uma profundidade menor será atingida, como é o caso dos arranjos Wenner e Schlumberger (Figura 22)

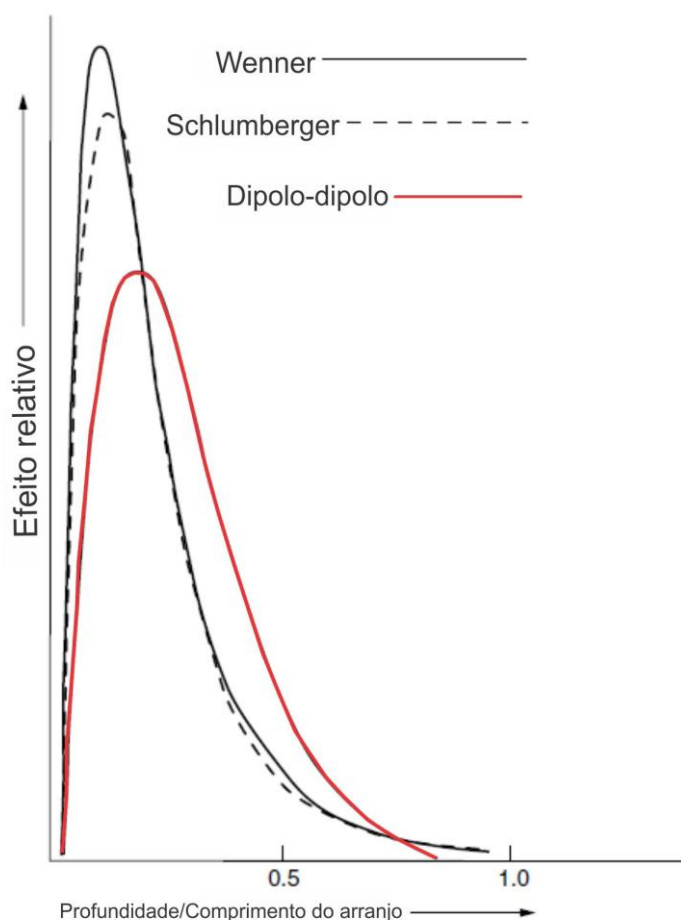


Figura 22: Efeito relativo *versus* profundidade analisada dos arranjos Wenner, Schlumberger e Dipolo-dipolo. Os arranjos Wenner e Schlumberger possuem um efeito relativo mais acentuado em profundidades menores em relação ao Dipolo-dipolo. Fonte: MILSOM, 2003.

As cavidades analisadas possuem de 0,5m a 1m de diâmetro, segundo os resultados geofísicos e dados de campo.

A análise comparativa entre os arranjos geofísicos e a descrição de uma exposição de *pipes* em superfície permitiu concluir que o arranjo Schlumberger foi o mais satisfatório para o reconhecimento de cavidades (Figura 23). Este arranjo apresenta uma elevada relação sinal/ruído (interferências). Neste caso, os eletrodos de corrente aumentam sua distância em relação aos eletrodos de potenciais, que são mantidos a medida que cada leitura é tomada. Com isso, é possível alcançar camadas cada vez mais profundas. O erro nas leituras também é amenizado devido ao posicionamento dos eletrodos de potencial no centro do arranjo, submetidos a um campo elétrico em redor, proporcionado pelos eletrodos de corrente posicionados nas extremidades do arranjo, o que torna os resultados mais precisos e próximos da realidade.

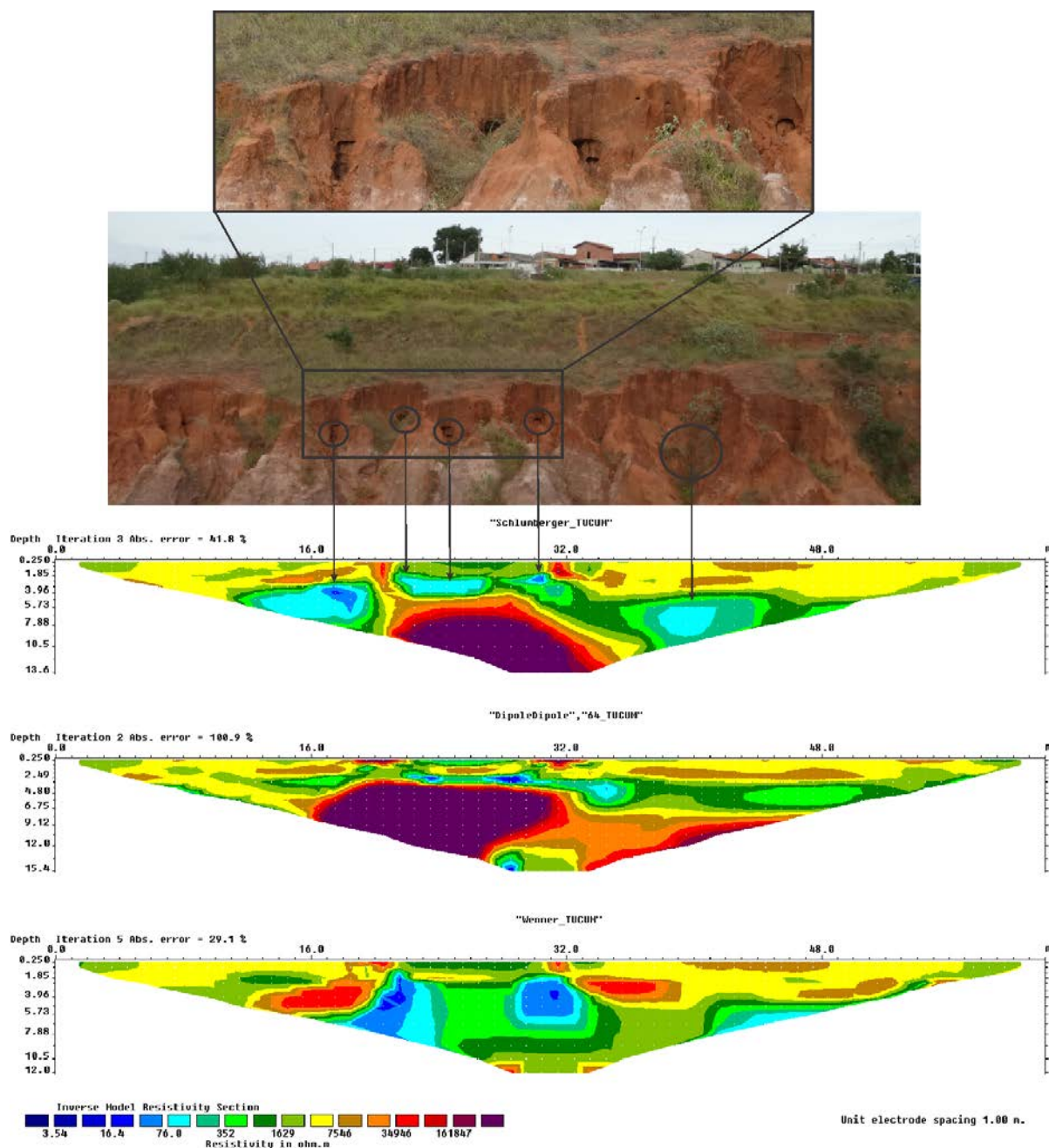


Figura 23: Seções geofísicas e fotos do local onde a linha foi instalada e detalhe das cavidades. De cima para baixo temos os arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.

No caso do arranjo Wenner, embora também ocorra a transmissão de corrente elétrica nos extremos do arranjo, os eletrodos de leitura são gradativamente espaçados a medida que os eletrodos de corrente são reposicionados, algo que reduz a sensibilidade deste arranjo.

O arranjo dipolo-dipolo foi responsável por um resultado mediano no trabalho. Foi possível fazer uma investigação em termos de profundidade, porém, lateralmente, os resultados não chegaram tão próximo da realidade quanto o Schlumberger. Neste caso a

condição foi prejudicial, pois comprometeu a qualidade dos resultados. Isso pode ser explicado analisando a geometria do arranjo. Os eletrodos de potencial ficam posicionados ao lado dos eletrodos de corrente, diferente dos arranjos Schlumberger e Wenner em que estes ficam posicionados entre os eletrodos de corrente, envolvidos pelo campo elétrico induzido. A cada medida feita, todos os eletrodos se movem e com isso, menor será a relação sinal/ruído e menos confiável serão os resultados.

Os resultados esperados para as cavidades previam elevados valores de resistividade onde seu interior estaria preenchido apenas por ar. Entretanto, os três arranjos geofísicos apresentaram regiões de baixa resistividade, o que segundo as interpretações, são as cavidades encontradas.

Estas regiões são caracterizadas por sua forma ovaladas nas seções e podem ser assim interpretadas porque no interior das cavidades temos a presença de água, já que a etapa de aquisição de dados geológicos e geofísicos foi realizada durante uma semana chuvosa. Na água temos o fenômeno de dissociação iônica que gera íons livres, isto proporciona valores baixos de resistividade, comparado ao meio em redor. Os arenitos que compõe a voçoroca apresentam resistividade alta graças à sua composição química, já que não possuem elétrons livres. A água no interior das cavidades pode ser proveniente tanto do lençol freático quanto do meio externo, através de chuvas.

Com as observações de campo foi possível constatar que as cavidades estão concentradas apenas em uma determinada região da voçoroca. Tal região possui vários pontos que favorecem a formação dessas estruturas. Houve um aplainamento na topografia, causada por atividade antrópica, onde atualmente está localizado um campo de futebol. Tal mudança de topografia resulta numa taxa maior de infiltração no local, que favorece a erosão interna, em que partículas de argilominerais, responsáveis pela coesão do solo são carregadas, aumentando o índice de porosidade, sendo estes poros ocupados por água. Como há uma diferença de porosidade entre a rocha e o solo, em que a rocha possui menos poros que o solo, as cavidades tendem a desenvolver no limite solo-rocha.

9. CONCLUSÃO

Com relação às medidas de contenção do processo erosivo; o histórico da área apresentou algumas medidas, porém nenhuma obteve êxito. Algumas medidas que poderiam ser adotadas são: plantação de bambus com o objetivo de desacelerar a erosão nas paredes da voçoroca; e pequenos diques feitos com o próprio entulho descartado ao longo da voçoroca a fim de reter o material particulado para que futuramente a profundidade da voçoroca diminua até o seu desaparecimento.

Este trabalho demonstra a eficácia do método da Eletorresistividade, com ênfase para o arranjo Schlumberger, na identificação de cavidades em subsolo. O método não nos mostra com precisão o formato das cavidades, e sim um conjunto de anomalias que deverão ser interpretadas. Através do contraste de resistividade elétrica, foi possível detectar as cavidades bem como sua continuidade, de pelo menos 15 metros, e também relacionar à possíveis eventos geológicos que colaboram com este processo. Com relação aos arranjos, o melhor resultado para este trabalho foi obtido com o arranjo Schlumberger, pois satisfaz em termos de profundidade e em nível de detalhe lateral além de apresentar uma elevada relação sinal/ruído onde os erros são amenizados devido à geometria do arranjo. Com isso, podemos concluir que a escolha de um arranjo errado pode nos induzir a interpretações incorretas.

Segundo Casseti (2005), o *pipe* está relacionado às diferenças texturais de seqüências litoestratigráficas ou de horizontes pedológicos. Como foi apresentado no capítulo 4.2, as cavidades se desenvolveram justamente no contato solo/rocha, sendo possível observar o que o autor propõe.

Podemos concluir que as cavidades encontradas na voçoroca são resultado de diversos fatores: fluxo interno de água e precipitação; presença de fraturamento na rocha; rocha muito permeável, que favorece o processo erosivo interno, contato solo-rocha presente e interferência humana que acaba por agravar o quadro erosivo da voçoroca. O estudo de cada fator é importante, pois permite a compreensão dos dados gerados.

Tendo em vista as conclusões acima, o trabalho demonstrou sua importância a fim de alcançar os objetivos e de gestão municipal, que disponibiliza subsídios para estudos de planejamento para uso e ocupação do solo, principalmente de áreas com risco geológico/geotécnico, onde há a possibilidade de evitar possíveis acidentes por meio de estudos como o presente trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ABEM INSTRUMENT AB. **Instruction Manual Terrameter LS**. ABEM Instrument AB. Sundbyberg, p. 112. 2012.

AHMED, S.; CARPENTER, P. J. Geophysical response of filled sinkholes, soil pipes and associated bedrock fractures in thinly mantled karst, east-central Illinois. **Environmental Geology**, v. 44, n. 6, p. 705-716, 2003.

ALMEIDA FILHO, G. S.; SANTORO, J.; GOMES, L. A. **Estudo da dinâmica evolutiva da boçoroca São Dimas no município de São Pedro, SP**. Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1. Florianópolis: GEDN/UFSC. 2004. p. 73-86 (CD-ROM).

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto de Geografia e Geologia**, São Paulo, v. 41, 1964.

ASSINE, M. L.; PIRANHA, J. M.; CARNEIRO, C. D. R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: MONTESSONETO, V. . B. A. . C. C. D. R. . B.-N. B. B. **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. [S.l.]: Becca, 2004. p. 77-92.

BACCARO, C. A. D. As unidades geomorfoógicas e a erosão nos chapadões no município de Uberlândia. **Revista Sociedade e Natureza**. Uberlândia, EDUFU, Ano 6, nº 11 e 12, 1994.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e Origem da Paisagens Tropicais**. 1. ed. [S.l.]: UFSC., v. 2, 1996. 875 p.

BRAGA, A. C. O. Métodos elétricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas. In: _____ **Geofísica Aplicada**. Rio Claro (Apostila): [s.n.], 2007.

CASSETI, V. Geomorfologia, 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 06 Fev. 2014.

CEPAGRI. Clima dos municípios paulistas. **Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura**, 2014. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_566.html>. Acesso em: 20 Fev. 2014.

CETESB. Métodos Geofísicos. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**, 1999. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/anexos/download/6200.pdf>. Acesso em: 19 Fev. 2014.

CPRM. **Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais**, 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/gis/geo_provincias.htm>. Acesso em: 21 Jan. 2014.

DIAS, K. D. N. **Análise Estratigráfica da Formação Pirambóia, Permiano superior da Bacia do Paraná, leste do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006.

DOURADO, J. C.; MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A. C. O.; NAVA, N. Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 19 (1), 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v19n1/15054.pdf>>. Acesso em: 13 Mai. 2014.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 2ª ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, DF. 2006.

FIGUEROLA, J. C. **Tratado de geofísica aplicada**. Instituto Geológico y Minero de España. Madri, Espanha, p. 520. 1974.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV ver.3.53 for Windows 98/ME/2000/NT/XP**. Geotomo Software. Gelugor, p. 125. 2003.

GUERRA, A. J. T. Ravinas: Processo de Formação e Desenvolvimento. **Anuário do Instituto de Geociências**, Laboratório de Geomorfologia Experimental e Erosão dos Solos (LAGESOLOS), v. 20, p. 9-26, 1997.

IPT. **Ocupação de encostas**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., Marcio Angelieri Cunha (coordendor). IPT, São Paulo. 1991. (Publ. IPT 1831).

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. **Environmental Geology**: Handbook of field methods and case studies. Germany: Springer, 2007.

MAGALHÃES, R. A. **Erosão**: Definições, tipos e formas de controle. Companhia energética de Minas Gerais (CEMIG). VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia: [s.n.]. 2001.

MATHIAS, D. T. **Proposta de recuperação de áreas peri-urbanas erodidas com base em parâmetros hidrológicos e geomorfológicos: córrego Tucunzinho (São Pedro/SP)**. Dissertação de Mestrado. UNESP/ IGCE. Rio Claro. 2011.

MILANI, E. J. Estratigrafia da Bacia do Paraná – Algumas considerações metodológicas. In: **I Encontro sobre a Estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudo e Bacias**, Porto Alegre, Anais, 18-22. 2003.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, Mai./Nov. 2007.

MILSOM, J. **Field Geophysics**. 3. ed. Inglaterra: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

MORAES REGO, L. F. **Notas sobre a Geomorfologia de São Paulo e sua gênese**. São Paulo: Inst. Astron. De Geofísico de São Paulo, 1932.

OLIVEIRA, J. B. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. **Campinas, Instituto Agrônomo. Boletim Científico** 45, 1999. 112.

- ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en corriente contínua**. Madri: Paraninfo, 1972.
- PONÇANO, W. L. et al. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: IPT, v. 1, 1981.
- SANCHEZ, M. C. Contribuição ao conhecimento das bases naturais dos Municípios de São Pedro e Charqueada (SP). **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 11, n. 21, p. 47-60, 1971.
- SCHNEIDER, R. L. et al. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. [S.l.]: [s.n.]. 1974.
- SILVA JUNIOR, J. S.; FERREIRA, F. J. F.; STEVANATO, R. Aplicação dos métodos gravimétrico e eletrorresistivimétrico-IP em área de risco geotécnico do sistema aquífero cárstico em Almirante Tamandaré-PR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v24n3/a09v24n3.pdf>>. Acesso em: 04 Jun. 2014.
- SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O. C. B. Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. **Revista Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 10-27, Mai. 2012.
- VALEZIO, E. V.; PEREZ FILHO, A. Mudanças na tipologia do canal fluvial: O caso do Córrego Tucum - São Pedro/SP. **Anais do IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, Rio de Janeiro**, 2012. Disponível em: <<http://www.sinageo.org.br/2012/trabalhos/2/2-412-436.html>>. Acesso em: 10 Fev. 2014.
- ZALÁN, P. V. Bacias Sedimentares da margem equatorial. In: HASUI, Y., et al. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. p. 497-501.