

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

LEONARDO PAIOLI CARRAZZA

IDENTIFICAÇÃO DE CAVIDADES EM VOÇOROCA POR
MEIO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO DA
ELETORRESISTIVIDADE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Geociências e Meio Ambiente .

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro – SP
2016

551 Carrazza, Leonardo Paioli
C313i Identificação de cavidades em voçoroca por meio da
aplicação do método geofísico da eletrorresistividade /
Leonardo Paioli Carrazza. - Rio Claro, 2016
64 f. : il., figs., fots.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Cesar Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Erosão interna. 3. Resistividade elétrica. 4.
Imageamento elétrico. I. Título.

LEONARDO PAIOLI CARRAZZA

IDENTIFICAÇÃO DE CAVIDADES EM VOÇOROCA
POR MEIO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO
GEOFÍSICO DA ELETORRESISTIVIDADE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão
Examinadora

Prof.Dr. César Augusto Moreira (Orientador)

Prof. Dr. Daniel Françoso de Godoy

Prof. Dr. José Ricardo Melges Bortolin

Conceito: aprovado

Rio Claro, SP, 11 de Março de 2016

Aos meus pais, avós e tios.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a todos que contribuíram de maneira direta para este trabalho. A começar pelo Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira pela orientação, pelas discussões construtivas, resolução de dúvidas e por estar sempre disposto a ajudar em todos os horários. A seguir, quero agradecer aos Profs. Drs. João Carlos Dourado e Walter Malagutti Filho por terem participado do exame geral de qualificação e ajudado a dar uma nova cara a este trabalho, sempre contribuindo com dicas e sugestões bem construtivas. Deixo aqui também meus agradecimentos à CAPES pelo financiamento desde que esse trabalho era um projeto de pesquisa.

Em segundo lugar, quero agradecer às pessoas que contribuíram de forma nem tão direta. Em primeiro lugar, a minha família, Sylvia Leda Paioli Carrazza e Mario Carrazza por terem me incentivado na elaboração do trabalho, por estarem interessados em saber o assunto, etc., além de terem ajudado com cópias salvas de segurança também. À minha amiga Isabela Tomazela Franzini por ter dado um bom auxílio em alguns softwares e por ter contribuído também com seu estudo prévio na área de estudos. Ao amigo Douglas Morais por alguns palpites no trabalho que de certa maneira também ajudaram na elaboração.

Em terceiro lugar, quero agradecer a todos envolvidos na organização do programa de pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente, especialmente à Rosângela Vacello.

Obrigado pelo apoio de todos,

Leonardo Paioli Carrazza

“(...)Hear this voice, from deep inside

It's the call of your heart

Close your eyes and you will find

The way out of the dark (...)”

Klaus Meine – Scorpions – Send me an Angel

Resumo: A expansão urbana desordenada pode gerar graves consequências ao ambiente. A falta de planejamento no escoamento de águas pluviais, aliado à baixa coesão de alguns terrenos pode proporcionar o surgimento de voçorocas, cuja evolução pode resultar em riscos geotécnicos para a população ao redor. Neste sentido, a geofísica possibilita um diagnóstico de produtos da evolução de voçorocas, como o fenômeno de *piping*, que consiste na geração natural de cavidades no solo. O contraste de resistividade elétrica entre o solo e o espaço vazio da cavidade possibilitam o uso do método da Eletrorresistividade neste tipo de estudo. Este método foi utilizado na investigação de uma voçoroca no município de São Pedro (SP), para a avaliação da continuidade de cavidades formadas por processos de erosão interna ou *piping*. Foram realizadas 6 linhas paralelas de imageamento elétrico para medidas de resistividade elétrica, com espaçamento de 1m entre eletrodos, de 5m entre linhas, por meio do arranjo Wenner-Schlumberger. A correlação entre dados geofísicos e cavidades revelou uma assinatura geolétrica de alta resistividade, possivelmente devido à ausência de preenchimento. A integração lateral das seções em mapas de isovalores para a profundidade de ocorrência das cavidades, revela o prolongamento e a ramificação de *pipings* em porções mais internas do terreno.

Palavras-chave: erosão interna. geofísica. resistividade elétrica. imageamento elétrico

Abstract: Unorganized urban expansion can result in several consequences to the environment. The absence of planning in the flow of rain water, allied with low cohesion in some terrains can generate gullies, which growing can offer geotechnical risks for the population. By this case, geophysics allows the diagnostic of some products from gully erosion, like the piping phenomena, where natural cavities are formed in the subsoil. The Electrical resistivity contrasts from the soil and the cavities filling material allows the application of Electrorresistivity method. The method was applied in a gully in São Pedro (SP) county to detect cavities formed in a process denominated internal erosion or piping. Were used 6 parallel lines of electrical imaging for the measurement of electrical resistivity values with 84 electrodes and spacing of 1m between each one, 5m between each acquisition line, by the Wenner-Schlumberger array. The results show high resistivity assignature probably due to the absence of filling in the cavities. The lateral integration of the sections in a isovalues map to the depth where occurs the cavities reveals the length and ramifications of the pipings in the internal portions of the terrain.

Key-words: piping. geophysics. electrical resistivity. electrical imaging.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Área de estudo. Fonte: adaptado de Google Earth, 2014.....	16
Figura 2 - a) Evolução do processo erosivo por ação de escoamento superficial, provenientes da área urbana (1962); b) (1965) e c) (1972). (ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> , 2004).....	17
Figura 3 – Detalhes da voçoroca em avançado estado de evolução. a) Profundidade do canal principal da voçoroca estimada em 60 metros (ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> 2004); b) Reativação dos processos erosivos (ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> , 2004).....	19
Figura 4 – a) Rompimento da estrada que liga São Pedro/Charqueada; b) Proximidade da erosão com moradias; c) Dique de terra construído pela Prefeitura a fim de ligar dois bairros (ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> , 2004).....	20
Figura 5 – Medidas não eficazes pela prefeitura a fim de conter o problema. a) Dique rompido b) Despejo de entulho e resíduos para conter erosão (ALMEIDA FILHO <i>et al.</i> , 2004).....	21
Figura 6 – Imagens aéreas da voçoroca; a) 2007; b) 2011; c) 2013 (Adaptado de Google Earth, 2014).....	22
Figura 7 – Parte da voçoroca com processos erosivos contidos pelo plantio de vegetação (arquivo pessoal).....	24
Figura 8 – Solo com vegetação natural rasteira e solo exposto (arquivo pessoal).....	24
Figura 9 – Encosta da voçoroca com os <i>pipes</i> ou surgências d'água (arquivo pessoal).....	25

Figura 10 – Encosta da voçoroca que é utilizada como depósito de resíduos (arquivo pessoal).....	25
Figura 11 – Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro/Limeira/Piracicaba (SP). Perinotto & Zaine (2008), modificado de Soares & Landim (1975), com destaque para as Formações Pirambóia e Botucatu.....	27
Figura 12 – Encosta da voçoroca com alteração da rocha (arquivo pessoal).....	28
Figura 13 – Contato do solo com a rocha e espessura aproximada. Ocorrência de <i>pipes</i> (arquivo pessoal).....	29
Figura 14 – Estágios da erosão linear. a) Sulcos (arquivo pessoal) b) Ravina (Zachar, 1982 c) Voçoroca (Mathias, 2010).....	31
Figura 15 – Estruturas típicas de solos colapsíveis a) tensão capilar b) Cimento com silte c) Agregação de grãos de argila d) Cimento com argila e) Cimento com silte ou argila f) Estrutura de grãos de argila (Adaptado de Hunt, 2006).....	31
Figura 16 – Papel da cobertura vegetal no ciclo hidrológico (Adaptado de Jorge & Uehara, 1998).....	34
Figura 17 – Ação de água pluvial sobre solo com vegetação (Adaptado de Macedo et al. 1998).....	34
Figura 18 – Modelo ideal de eletrorresistividade (adaptado de Mussett & Kahn, 2000).....	37
Figura 19 – Propagação de corrente elétrica e geração de superfícies equipotenciais em um semi-espaço (Adaptado de TELFORD et al., 2004).....	38
Figura 20 – Propagação de corrente elétrica em subsuperfície (Adaptado de MUSSETT & KAHN, 2000).....	39

Figura 21 – Circuito para medição de valores de resistividade elétrica (Adaptado de Knödel <i>et al.</i> , 2007).....	39
Figura 22 – Arranjo Wenner em que “a” é o espaçamento entre os eletrodos (MILSOM, 2003).....	41
Figura 23 – Esquema do arranjo Schlumberger (adaptado de Milsom, 2003).....	42
Figura 24 – Pseudo-seção esquemática de valores de resistividade elétrica (Adaptado de MUSSETT & KAHN, 2000).....	43
Figura 25 – Modelo de inversão esquemático de resistividade elétrica (adaptado de MILSOM & ERIKSEN, 2011).....	43
Figura 26 – Vista aérea das linhas de aquisição de dados geofísicos: linha 1 (L1) a linha 6 (L6). (Adaptado de Google Earth, 2014).....	46
Figura 27 – Perfil esquemático sem escala com a visualização da posição das linhas de aquisição em relação ao canal principal da voçoroca (arquivo pessoal).....	47
Figura 28 – Espaçamento entre as linhas de imageamento elétrico (arquivo pessoal).....	47
Figura 29 – Terrameter LS (Arquivo pessoal).....	48
Figura 30 – Blocos retangulares e pontos de dados de resistividade aparente (adaptado de Geotomo, 2003).....	49
Figura 31 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 1 com sobrelevação de 1x e cavidades identificadas (arquivo pessoal).....	51

Figura 32 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 2 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).....	51
Figura 33 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 3 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).....	52
Figura 34 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 4 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).....	53
Figura 35 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 5 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).....	54
Figura 36 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 6 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).....	55
Figura 37 – Superfície plana em que foi realizada a linha 6 (arquivo pessoal).....	55
Figura 38 – Esquema de rebaixamento de nível freático (adaptado de Rodrigues, 2014).....	56
Figura 39 – Visualização em 3D dos valores de resistividade elétrica em subsuperfície em a) 2m de profundidade; b) 3m de profundidade (arquivo pessoal).....	57
Figura 40 – Cavidades inferidas em relação às linhas de aquisição de dados (arquivo pessoal).....	58
Figura 41 – Croqui representando os diques com sedimentação na base (Arquivo pessoal).....	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. ÁREA DE ESTUDO.....	16
3.1 Histórico do processo erosivo.....	16
3.2 Situação atual da voçoroca.....	23
4. GEOLOGIA REGIONAL.....	26
4.1 Geologia local.....	27
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
5.1 Erosão.....	30
5.1.1 Fatores que controlam a erosão.....	32
5.1.2 Influência da intensidade das chuvas.....	33
5.1.3 Influência da cobertura vegetal.....	33
5.1.4 Influência do relevo.....	35
5.1.5 Influência do substrato rochoso e solo nos processos erosivos.....	35
5.1.6 Métodos de investigação de processos erosivos.....	36
5.2 Geofísica aplicada.....	36
5.2.1 Resistência elétrica e resistividade elétrica.....	37
5.2.2 Método da Eletrorresistividade.....	38
5.2.3 Eletrodos e arranjos utilizados.....	40
5.2.4 Técnica do Imageamento Elétrico e aplicações.....	42
6. AQUISIÇÃO DE DADOS.....	46
6.1 Processamento dos dados geofísicos.....	48
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
7.1 Apresentação e discussão dos modelos de inversão.....	50
7.2 Integração dos dados dos modelos de inversão.....	56
7.3 Recomendações para atenuação dos processos erosivos.....	58

8. CONCLUSÕES.....60

9. REFERÊNCIAS.....61

1. INTRODUÇÃO

Processos erosivos ocorrem devido às condições do meio e podem ser acelerados ou contidos pela ação humana. Em regiões muito urbanizadas, há maior impermeabilização do solo, o que pode acarretar em maior escoamento de água superficial. Esse escoamento maior, combinado com uso e ocupação indevidos do solo, pode tornar os processos erosivos mais acentuados.

A ocupação indevida ocorre, em grande parte, em terrenos de regiões de periferia e com valores mais acessíveis ao público de baixa renda. A exposição dos solos aos agentes erosivos devido à falta de planejamento, pode resultar em graves consequências. Essas tomadas desordenadas, sem os mínimos critérios técnicos de engenharia e planejamento na definição de ruas e no sistema de coleta e canalização de águas pluviais, associada a ocorrências de solos mais permeáveis, aumentam a probabilidade de surgimento de processos erosivos. Estes podem ser acelerados e são desenvolvidos como: escorregamentos, abatimentos, ravinas e um consequente aprofundamento de ravinas para voçorocas (INFANTI JR & FORNASARI FILHO, 1998).

O termo voçoroca ou boçoroca é originado da linguagem indígena “*ibi-çoroc*” ou “*mbaê-çoroc*” e significa terra ou coisa rasgada. São formadas pelo aprofundamento das ravinas, pela interceptação do nível freático e podem ocorrer alguns outros processos associados com a interação de água superficial e subsuperficial: *pipings*, escorregamentos laterais e erosão superficial (ALMEIDA FILHO, GOMES, SANTORO, 2004).

A importância de estudos relacionados à formação e ao desenvolvimento de voçorocas é estabelecer medidas de prevenção e controle, bem como combater o processo (HUNT, 2006). Apesar da erosão e surgimento de voçorocas serem fenômenos naturais, quando ocorrem em regiões próximas a algumas moradias ou área urbanizada, o crescimento da voçoroca é um grande risco para a população adjacente ao local da erosão que pode sofrer com futuros desabamentos e deslizamentos pelas encostas da voçoroca.

A formação e desenvolvimento de voçorocas podem estar associados ao surgimento de cavidades como os *pipes*. Estes são cavidades no solo, com forma tubular, desenvolvidas no fenômeno denominado *piping*, em que há a concentração do fluxo d’água no interior de solos permeáveis (HUNT, 2006). Esse fluxo ao ficar

mais concentrado, pode aumentar a dimensão das cavidades e acarretar em desabamentos da área sobrejacente e, em caso das regiões urbanas, grandes perdas.

Diante da necessidade de melhor controle da evolução dos *pipes*, é necessário que haja estudos para identificar o alcance das cavidades em subsuperfície, tanto com medidas diretas quanto com indiretas.

A geofísica é uma área de estudos em geociências que abrange métodos indiretos de investigação e representa uma "ciência aplicada em estudos de estruturas do interior da Terra, entre elas cavidades, e da localização de materiais delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, utilizadas para esta finalidade, medidas tomadas na superfície da terra ou da água, interior de furos de sondagens ou em levantamentos aéreos" (ORELLANA, 1972).

A geofísica é consagrada em pesquisa mineral e também em estudos ambientais, hidrogeológicos, de hidrocarbonetos, entre outros. Os métodos geofísicos mais utilizados em estudos ambientais são Eletrorresistividade, eletromagnéticos e Potencial Espontâneo (KNÖDEL, LANGE, VOIGT, 2007).

Alguns métodos geofísicos, como a Eletrorresistividade, permitem a caracterização de cavidades em subsuperfície, pois a aquisição de dados ocorre de forma rápida e os resultados de seu processamento mostram contrastes significantes de propriedades físicas dos materiais que preenchem as feições. Porém, para a interpretação final dos resultados é necessário também o conhecimento geológico do local estudado bem como possíveis estruturas que podem provocar ruídos.

Diversos trabalhos mostraram a aplicabilidade da Eletrorresistividade na identificação de cavidades tanto em cavas abandonadas de mineração, em *pipes* em uma mineração de areia e em sítios arqueológicos (DOURADO *et al.*, 2001; LAZZARI, LOPERTE, PERRONE 2010; MARTINEZ PAGÁN *et al.*, 2013).

Resultados obtidos nestes trabalhos com contrastes de assinatura geoeletricas para cavidades no subsolo demonstraram que a geofísica pode ser aplicada na detecção de cavidades em subsuperfície.

2. OBJETIVOS

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo aplicado na detecção de cavidades naturais desenvolvidas ao longo de uma margem de um canal de voçoroca, situada no município de São Pedro (SP).

Após a detecção, houve a finalidade de analisar a continuidade lateral das cavidades aflorantes na lateral da voçoroca.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de São Pedro, interior do Estado de São Paulo, distante 191 km da capital, próximo a importantes centros administrativos e comerciais regionais, como Piracicaba, São Carlos e Rio Claro. A área pode ser acessada, com ponto de partida em São Paulo, pela Rodovia dos Bandeirantes, SP-348, e posteriormente pelas SP-135 e SP-304. Com partida de Rio Claro, pode ser acessado pela Rodovia Geraldo de Barros (SP-191) (Figura 1).



Figura 1 - Área de estudo. Fonte: adaptado de Google Earth 2014.

3.1 Histórico do processo erosivo

A evolução da voçoroca foi descrita por Almeida Filho, Gomes, Santoro (2004) com base em fotografias aéreas e descrições locais de visitas técnicas realizadas desde a década de 60 (Figuras 2 a 5). A evolução pode ser complementada por imagens aéreas do Google Earth de 2007 a 2013 (Figura 6).

Com o início da ocupação das localidades próximas à voçoroca, processos erosivos causados pelo escoamento de águas pluviais provenientes da área urbana começaram a atuar nos braços de drenagem adjacentes ao canal principal da voçoroca nos anos de 1962 a 1979 (Figura 2).

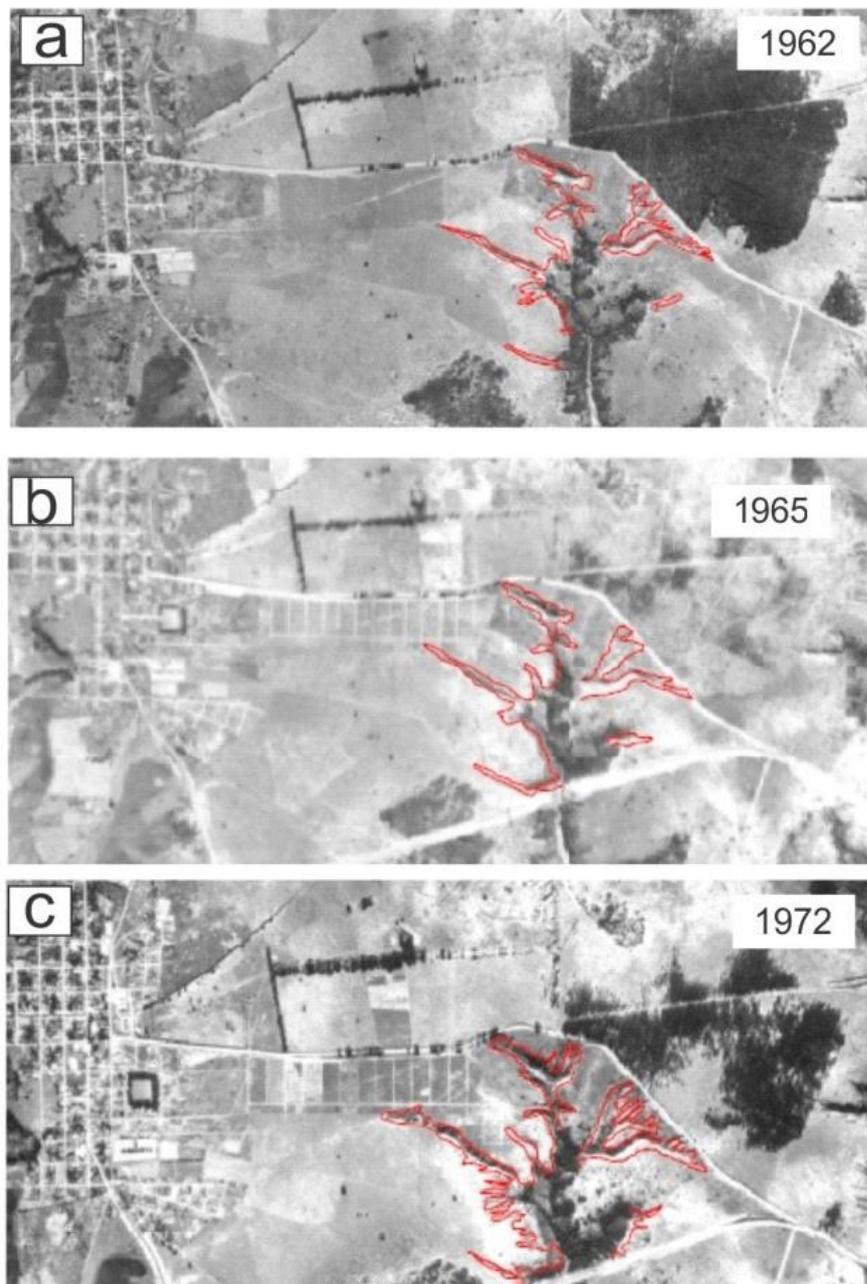


Figura 2 - a) Evolução do processo erosivo por ação de escoamento superficial, provenientes da área urbana (1962); b) (1965) e c) (1972). (ALMEIDA FILHO, GOMES, SANTORO, 2004).

Com base na figura 2a, em 1962, a erosão ocorreu em uma área agrícola, ou seja, foi causada essencialmente por uso e ocupação indevidos do solo, combinado com escoamento superficial acelerado.

Havia mais braços de drenagem na margem oeste da voçoroca, a qual apresenta maior proximidade com a região urbanizada. Ao leste, havia uma densa vegetação, mas braços de drenagem do canal principal da voçoroca já atingiam proximidades de uma estrada.

Em 1965 (Figura 2b), a área urbana expandiu moderadamente em direção aos ravinamentos, devido à implantação de um loteamento. Essa implantação próxima a um dos braços do processo erosivo favoreceu um maior escoamento da água pluvial.

Em 1972 (Figura 2c), a área urbana havia avançado em direção à voçoroca, em relação a 1965. Os braços de drenagem estavam maiores, devido ao maior escoamento superficial de água pluvial da área urbanizada. A proximidade da cabeceira da voçoroca em relação à área urbanizada comprometeu o loteamento e uma estrada vicinal de terra. O lado leste da voçoroca estava significativamente erodido e começava a ameaçar as estradas mais próximas.

Em 1979, a voçoroca estava próxima de uma área urbana desenvolvida e com profundidade aproximada de 60 metros (Figura 3a). Nesta imagem é possível observar que a encosta possuía declividade extremamente acentuada e com solo totalmente exposto. Essas condições são as mais propícias para que a erosão seja acentuada. Com estas condições, a voçoroca aumentava suas dimensões.

Em 1979, o crescimento da voçoroca e o perigo oferecido à região urbana, fizeram com que houvesse um diagnóstico da erosão para subsidiar a elaboração de uma proposta de trabalho. Este visou apresentar medidas para conter o processo erosivo, assim como a remoção da população que vivia em moradias adjacentes à voçoroca. Tal proposta foi recusada pelo Governo do Estado de São Paulo.

Em 1991, houve novo diagnóstico do processo erosivo ao qual foi atribuído estado de criticidade. Medidas como terraplanagem e terraceamento em nível no processo erosivo, construção de diques internos e marginais, drenagem subterrânea com feixe de bambu, rebatimento de taludes e aterramento foram realizadas. Contudo, uma medida essencial foi esquecida como coleta e condução da água das bacias de contribuição, por sistemas de drenagem até um ponto mais estável da voçoroca.

Além disso, as medidas mitigadoras não foram aplicadas da maneira mais adequada e os processos erosivos começaram a agir de forma mais acelerada o que causou uma evolução rápida da erosão à remontante (Figura 3b).

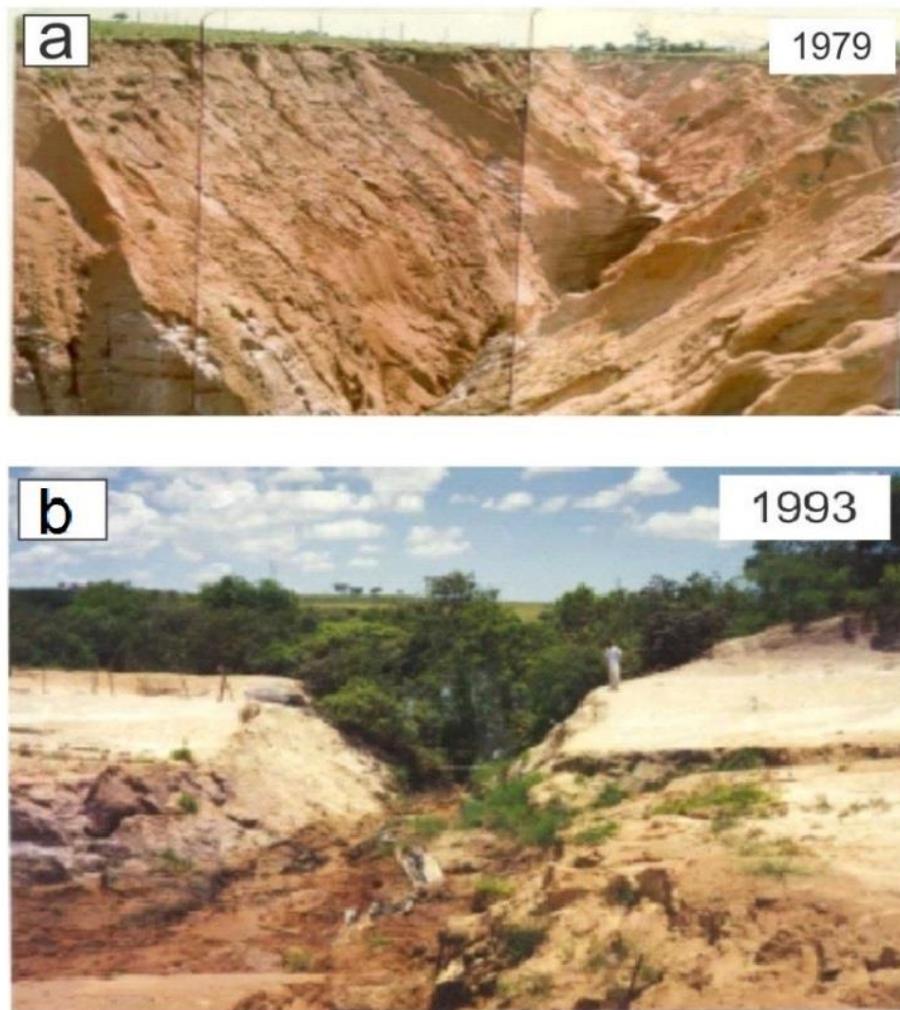


Figura 3 - Detalhes da voçoroca em avançado estado de evolução. a) Profundidade do canal principal da voçoroca estimada em 60 metros (ALMEIDA FILHO *et al.* 2004); b) Reativação dos processos erosivos.

No ano de 1995, a elevada pluviosidade no verão fez com que a erosão fosse acentuada ainda mais e causasse o rompimento da rodovia que liga São Pedro a Charqueada (SP) (Figura 4a). Além disso, a intensidade elevada da erosão fez com que as cabeceiras chegassem próximas a áreas urbanizadas (Figura 4b)

Para resolver parcialmente as dificuldades de locomoção urbana, impostas pelo desenvolvimento acentuado da voçoroca, a prefeitura construiu um dique de terra em 2002 para facilitar a ligação entre dois bairros separados pela voçoroca (Figura 4c).

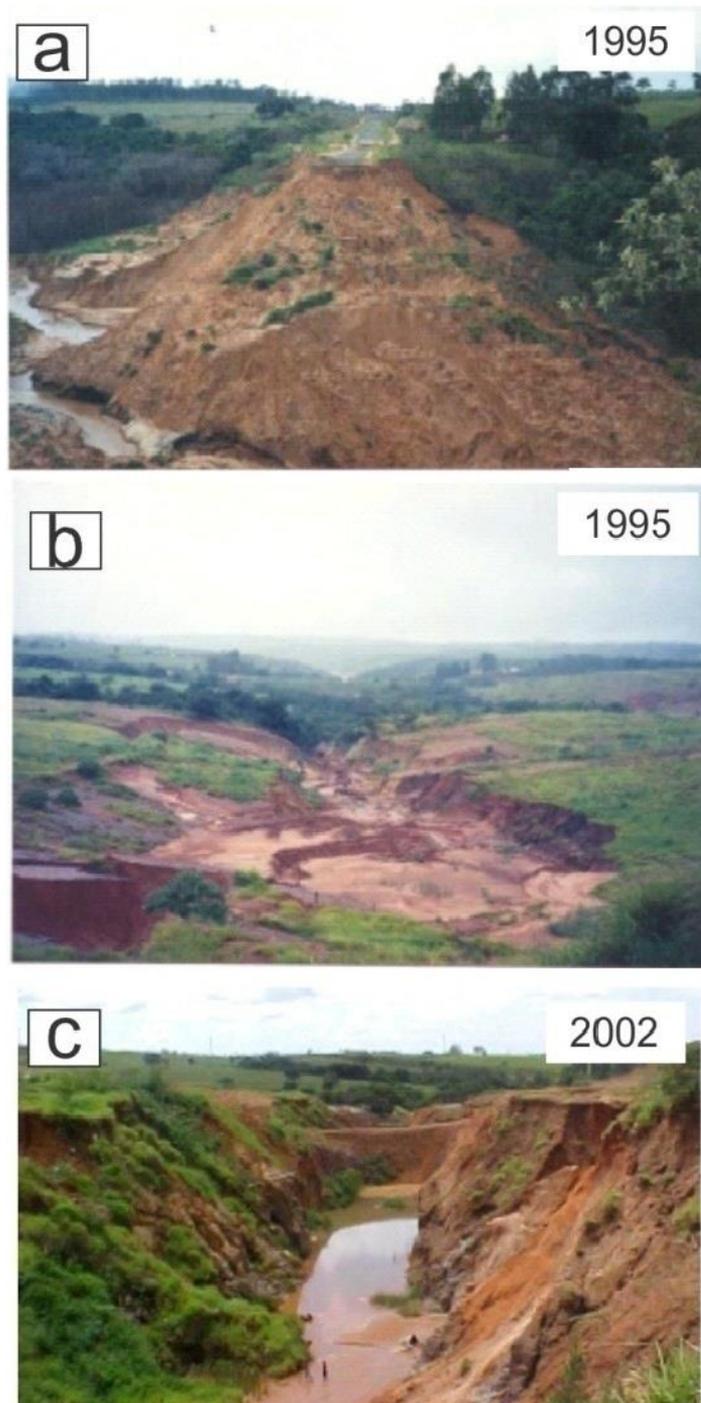


Figura 4 – a) Rompimento da estrada que liga São Pedro/Charqueada; b) Proximidade da erosão com moradias; c) Dique de terra construído pela Prefeitura a fim de ligar dois bairros.

A construção do dique de terra não foi adequada e em 2003 ele foi rompido no canal principal da voçoroca (Figura 5a). A partir do ano de 2004, novas medidas inadequadas foram realizadas como a deposição de entulho e resíduos no interior da voçoroca, por parte da Prefeitura Municipal, para contenção dos processos erosivos (Figura 5b).

Medidas como a construção de apenas um dique para conter a erosão não são eficazes. O dique então construído com o mesmo material arenoso da voçoroca não suportou a força da água pluvial na época. Chuvas intensas com alta vazão de água resultou em uma pressão muito intensa sobre o dique, o que causou o seu rompimento.



Figura 5 - Medidas não eficazes pela prefeitura a fim de conter o problema. a) Dique rompido b) Despejo de entulho e resíduos para conter erosão.

Para o ano de 2007, é possível observar que a voçoroca havia passado por processo de terraceamento, mas estava praticamente sem cobertura vegetal nos terraços (Figura 6a). As únicas partes cobertas estavam na porção leste da voçoroca, nas proximidades de uma estrada de terra, ou associadas ao canal principal da feição erosiva. Ou seja, a voçoroca não apresentava proteção natural principalmente para a precipitação pluvial e continuava sujeita a sofrer processos erosivos.

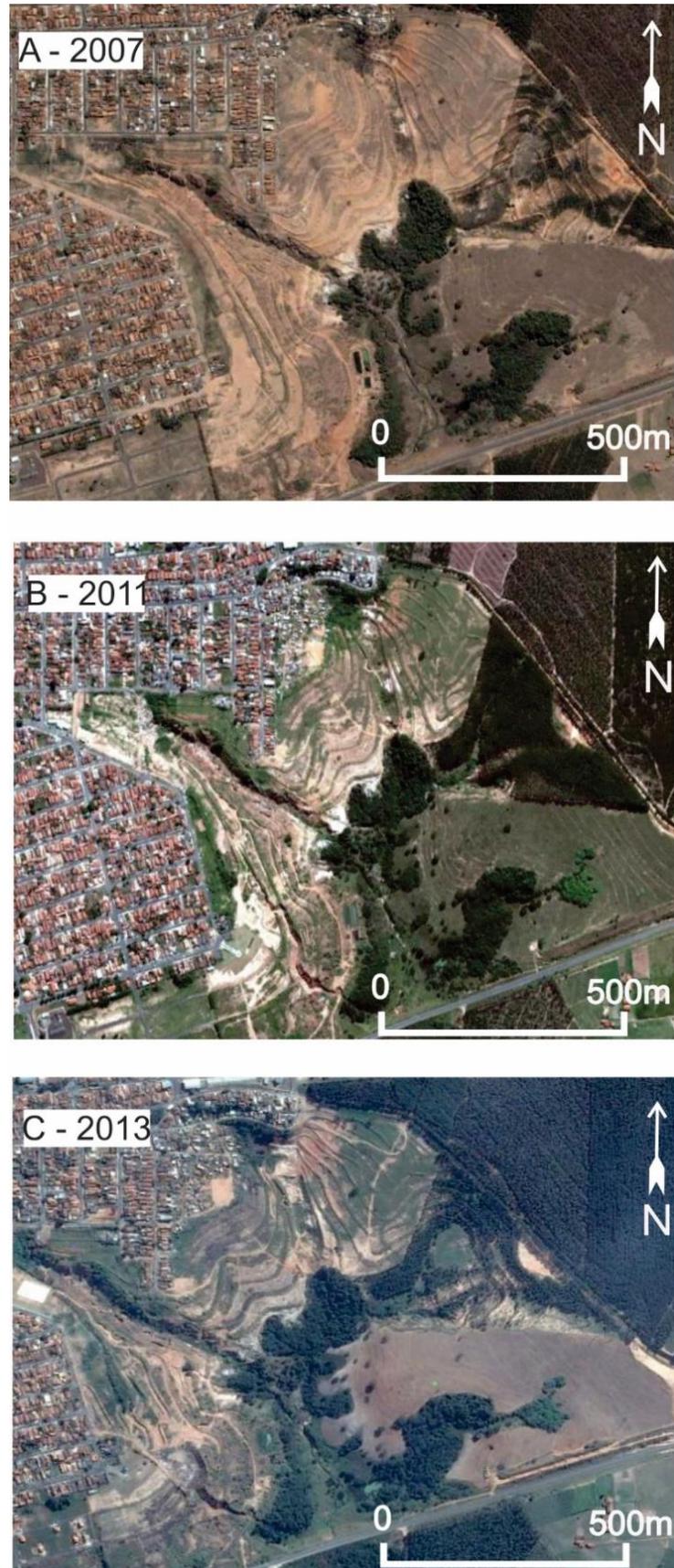


Figura 6 – Imagens aéreas da voçoroca; a) 2007; b) 2011; c) 2013 (Adaptado de Google Earth, 2014)

Em 2011, houve maior crescimento de vegetação nos níveis da voçoroca, indicativo de um período de estabilidade do processo erosivo (Figura 6b). Na porção leste próxima a uma estrada de terra, é possível observar uma vegetação densa de grande porte, ao passo que as demais áreas com cobertura vegetal na voçoroca continham vegetação de menor porte. Na porção oeste, havia maior área com solo exposto. Em relação a 2007, a voçoroca estava protegida de processos erosivos.

Em 2013, a região próxima à estrada de terra estava coberta em grande parte por vegetação densa, ao passo que o restante da área da voçoroca, por vegetação de menor porte (Figura 6c). De maneira geral, houve maior crescimento da vegetação de menor porte nos níveis da voçoroca, bem como no lado oeste em que, dois anos antes, o solo estava exposto.

3.2 Situação atual da voçoroca

A voçoroca apresenta profundidade de aproximadamente 25 metros e extensão de aproximadamente 200 metros. Durante anos, a área passou por intensos processos erosivos, embora tenha havido a recuperação de alguns pontos. A medida consistiu no plantio de vegetação e nesta área do plantio não é possível observar sequelas de processos erosivos (Figura 7).

O solo exposto contém vegetação natural rasteira ou está completamente exposto às intempéries (Figura 8). Em alguns locais, o solo apresenta marcas de erosão linear e nas encostas da voçoroca e é possível notar *pipes* ou surgências d'água (Figura 9).

Para que a vegetação natural pudesse crescer em uma das encostas da voçoroca, foram construídos rampas e patamares. Com isso, é possível o desenvolvimento de vegetação natural e melhor contenção de processos erosivos. Por outro lado, na outra encosta não foram tomadas medidas para conter os processos erosivos.



Figura 7 – Parte da voçoroca com processos erosivos contidos pelo plantio de vegetação (arquivo pessoal).



Figura 8 – Solo com vegetação natural rasteira e solo exposto (arquivo pessoal).



Figura 9 – Encosta da voçoroca com os *pipes* ou surgências d'água (arquivo pessoal).

Uma das encostas da voçoroca é utilizada para depósitos de resíduos sem matéria orgânica (para que não ocorra a formação de lixiviado). Porém, há madeira e matéria orgânica em geral nos resíduos (Figura 10). Além do risco de produção de lixiviado e consequente contaminação por parte do mesmo, a matéria orgânica quando decomposta, passa a ocupar espaços menores, algo que pode acarretar em recalques.



Figura 10 – Encosta da voçoroca que é utilizada como depósito de resíduos (arquivo pessoal).

4. GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná. Segundo Schneider *et al.* (1974), esta bacia possui mais de um milhão de quilômetros quadrados de área apenas no Brasil, com extensões na Argentina, Uruguai e Paraguai, somando uma área total de 1,6 milhão de km².

De acordo com Almeida & Melo (1981), a Bacia do Paraná foi estabelecida sobre a Plataforma Sul-Americana a partir do Devoniano Inferior ou do Siluriano. O Estado de São Paulo está localizado em maior parte nesta bacia sedimentar. Devido a subsidências, foi possível a deposição de sedimentos, extravasamento de lavas basálticas e intrusões de sills de diabásio. A região mais profunda da bacia chega a ultrapassar os cinco mil metros de espessura desses depósitos citados.

Na região de estudo, ocorrem as formações do Grupo Itararé, Formações Tatuí, Irati, Corumbataí, Pirambóia e Botucatu (Figura 11). Porém, neste trabalho será dado ênfase para as Formações Pirambóia e Botucatu.

Com idade do Triássico, a Formação Pirambóia contém unidades litológicas compostas por arenitos com granulometria média a fina, cor amarela esbranquiçada ou avermelhada, com grãos sub arredondados e polidos, além de, intercalações com finas camadas de argilitos e siltitos – também apresentam algumas estruturas sedimentares como estratificações cruzada, planar e acanalada nos arenitos e estratificação plano - paralela nos níveis lamíticos (SCHNEIDER *et al.*, 1974). A Formação Pirambóia engloba secundariamente níveis de sílex (OKA-FIORI, 2002).

O ambiente deposicional é continental fluvial e desértico. Simões & Fittipaldi (1992), catalogaram os fósseis: artrópodes Conchostráceos e Ostracodes.

A Formação Botucatu possui espessura da ordem de 100 metros, idade juro-cretácea e constituída de arenitos avermelhados, com contato basal com a muitas vezes concordante. A unidade está diretamente associada a processos eólicos em ambiente desértico, e apresenta comumente estratificações cruzadas de grande porte. Não são encontrados fósseis nesta Formação (SCHNEIDER *et al.*, 1974; OKA-FIORI 2002).

ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espess. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENOZOICA	QUATERNÁRIO	SÃO BENTO	RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE <i>(Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro)</i>	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. DÍQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO <i>(Basalto e diabásio = matéria-prima para brita)</i>	MAGMATISMO FISSURAL
	JURÁSSICO		BOTUCATU		100	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E BEM ESFÉRICOS. POUCA ARGILA <i>Agulheiro Guarani</i>	CONTINENTAL: DESÉRTICO
	TRIÁSSICO		PIRAMBÓIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS. DIVERSOS NÍVEIS DE LÂMITOS	CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	CORUMBATAI		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS E COQUINAS <i>(Argilos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)</i>	CONTINENTAL: LACUSTRE TRANSICIONAL: PLANÍCIE DE MARÉ
			IRATI		40	FOLHELHOS, SILTITOS, FOLHELHOS PIROBETUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS <i>(Irati tem sido usado na região de Araraquã para a fabricação de cimento)</i>	TRANSICIONAL: LAGUNA MARINHO RASO; PLATAFORMA
		ITARARÉ	TATUI		50	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS	TRANSICIONAL: PLANÍCIE COSTEIRA MARINHO RASO; PLATAFORMA
			Grupo ITARARÉ (indiviso no Estado de São Paulo)		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS TILITOS) <i>(Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços profundos da região)</i>	CONTINENTAL (GLACIAL): ALUVIAL - LEQUES E FLUVIAL; LACUSTRE TRANSICIONAL: DELTAS MARINHO (GLACIO-MARINHO): PLATAFORMAL
	CARBONIFERO						
Pré-Cambriano			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS	

Figura 11 – Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro/Limeira/Piracicaba (SP), com destaque para as Formações Pirambóia e Botucatu (Perinotto & Zaine (2008), modificado de Soares & Landim (1975)).

4.1 Geologia local

A Formação aflorante no local é a Pirambóia. Mais próximo da área de estudo, Azevedo, Pressinotti, Massoli (1981) descrevem esta unidade como constituída por arenitos de granulação que varia de fina a média, as vezes grosseira, com matriz silto-argilosa. Sua composição é essencialmente quartzosa e apresenta grãos subarredondados a subangulosos. É possível ainda observar minerais ferro-magnesianos.

Em campo, a rocha está bastante alterada e apresenta cor creme amarronzada e está presente em toda a encosta da voçoroca. A rocha sã é de cor creme avermelhada com grãos arredondados e subarredondados. Na encosta da voçoroca, a espessura da camada de rocha é de aproximadamente 20 metros e, devido ao grau de alteração elevado, não é possível identificar localmente a presença de estruturas (Figura 12).



Figura 12 – Encosta da voçoroca com alteração da rocha (arquivo pessoal).

De acordo com Almeida Filho, Gomes, Santoro (2004), o solo da região é constituído por areia muito friável e de elevada porosidade, índices de vazios relativamente altos e baixos valores de coesão e ângulo de atrito interno do sedimento da voçoroca. Esses fatores contribuem para que haja erosão acelerada.

O trabalho de Mathias (2011), caracteriza os tipos de solos que ocorrem localmente: Argissolos (solos podzólicos vermelho amarelo), Neossolos Quartzarênicos (areias quartzosas profundas) e Gleissolos. Os Argissolos estão ligados ao arenito Botucatu e ocupam grande parte da bacia, com textura entre média e arenosa, apresentando problemas de suscetibilidade à erosão. Os Neossolos Quartzarênicos aparecem dominando os interflúvios mais amplos avançando pelas médias vertentes de menor declividade. Apresentam frações de areia fina a grossa e possuem alto grau de acidez, o que os torna quase inviáveis à agricultura. Finalmente, os Gleissolos aparecem compondo as áreas de várzea e planícies aluviais do Córrego Tucum, do qual o córrego Tucunzinho é afluente.

Em campo, o solo apresenta espessura de aproximadamente 2 metros, cor marrom avermelhada na parte inferior e acinzentada na superfície. Há contato entre o solo e a rocha local, em cuja proximidade, ocorrem os *pipes* (Figura 13).



Figura 13 – Contato do solo com a rocha e espessura aproximada. Ocorrência de *pipes* (arquivo pessoal).

Quanto aos aspectos agronômicos, Oliveira (1999) complementa a descrição de solos afirmando que são pobres em nutrientes, muito devido à lixiviação intensa que atua sobre a superfície dos solos. O que aumenta o processo de lixiviação é a baixa capacidade do solo em reter água.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Erosão

O termo erosão é derivado da palavra *erodere* que, em latim, significa escavar. O termo foi empregado pela primeira vez para descrever processos de remoção de partículas que envolviam ação da água dos rios, ao passo que a ação de água pluvial em superfície era conhecida como ablação (ZACHAR, 1982).

Atualmente, erosão pode ser entendida como o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou de fragmentos de rochas, pela ação combinada da gravidade com a água, ventos, gelo e organismos (ZACHAR, 1982). É um processo mecânico que age em superfície e em profundidade, em certos tipos de solo e sob determinadas condições físicas, naturalmente relevantes, e fica crítica pela ação catalisadora do homem (MAGALHÃES, 2001).

No caso de erosão causada por águas pluviais, o processo pode ocorrer de duas formas distintas, a depender da maneira que ocorre o escoamento superficial: erosão laminar ou erosão linear.

No primeiro caso, ocorre escoamento na superfície que remove os horizontes superficiais do solo. Como consequência, há a perda da fertilidade do solo local e o material removido pelo fluxo d'água pode provocar assoreamentos em rios, lagos e reservatórios próximos (INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

No segundo caso, o fluxo d'água na superfície é concentrado em linhas de fluxo que inicialmente deixam marcas no solo sob a forma de sulcos. Caso a água pluvial continue a ação sobre os sulcos, estes podem crescer para ravinas e, posteriormente, para voçorocas em que há a interceptação do nível freático (Figura 14).



Figura 14 – Estágios da erosão linear. a) Sulcos (arquivo pessoal); b) Ravina (Zachar, 1982); c) Voçoroca (Mathias, 2010)

Voçorocas estão relacionadas geralmente a solos colapsíveis que, por sua vez, em maioria são arenosos. Nesse tipo de solo há a predominância de areia fina a média e pouca proporção de argila e silte (FELL & FRY, 2013). A argila e o silte funcionam como cimento que fica nos poros entre as partículas de areia, o que oferece coesão maior ao solo, em conjunto com a tensão capilar (HUNT, 2006) (Figura 15).

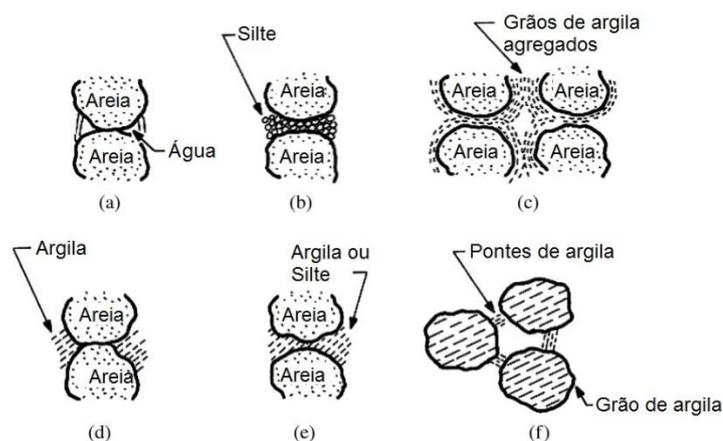


Figura 15 – Estruturas típicas de solos colapsíveis: a) tensão capilar; b) Cimento com silte; c) Agregação de grãos de argila; d) Cimento com argila; e) Cimento com silte ou argila; f) Estrutura de grãos de argila (Adaptado de Hunt, 2006).

Caso a erosão não seja desenvolvida apenas pelas influências das águas superficiais, mas também pela ação de fluxos d'água subsuperficiais como o nível freático, pode haver a formação de voçorocas, com o desenvolvimento da erosão

interna ou *piping* (INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

O *piping* é um tipo de ruptura hidráulica causada pelas forças de percolação da água quando há coesão no solo. Partículas do solo podem ser arrastadas o que permite a abertura de pequenos orifícios pelos quais o fluxo começa a ser concentrado, passa a carrear o material e dá origem a uma pequena cavidade. Esta pequena cavidade acaba por concentrar mais o fluxo subterrâneo e pode aumentar significativamente de dimensão (AZEVEDO & ALBUQUERQUE FILHO, 1998; HUNT, 2006).

Além do *piping*, a voçoroca pode ser local de outros fenômenos como erosão superficial, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, isto é, um processo erosivo acelerado e destrutivo que pode chegar a ameaçar regiões urbanas adjacentes (ZACHAR, 1982).

Porém, há uma outra visão a respeito da formação de voçorocas que não remetem apenas ao aprofundamento de ravinas e interceptação do nível freático. Essa formação tem sua origem um pouco complexa e relacionada a solos cuja vegetação sofreu com queimadas. As queimadas deixam pequenas cicatrizes no solo, as quais concentram a água pluvial e sofrem erosão até serem ampliadas suficientemente para formar a voçoroca (MORGAN, 2005).

Segundo o autor, ainda há outro caso de formação de voçoroca, relacionado à subsidência de solo sobre uma rede de captação de fluxo d'água. Em um caso registrado em Hong Kong, uma forte chuva atingiu o sistema de captação de fluxo d'água e a rede não suportou a enorme quantidade de água, que resultou na subsidência do solo acima dos canos.

5.1.1. Fatores que controlam a erosão

Os fenômenos associados à formação de erosões lineares profundas são causados por dois fatores principais: fatores antrópicos (como desmatamento, uso e ocupação indevida do solo que agravam os processos erosivos ao longo do tempo) e também por fatores naturais (como intensidade das chuvas, cobertura vegetal, relevo, solo e substrato rochoso) (INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998). Esses fatores podem servir como agravantes ou mitigadores de processos erosivos.

5.1.2 Influência da intensidade das chuvas

As gotas de chuva provocam erosão devido a sua velocidade e energia, e são mais intensas caso atinjam solos expostos e permeáveis. Suas ações erosivas dependem da distribuição pluviométrica, isto é, chuvas acumuladas e com intensidade elevada oferecem maior potencial erosivo (ZACHAR, 1982; INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998). Basicamente, a erosão causada pelas gotas de chuva está diretamente relacionada com a energia cinética da água pluvial.

Outro fator relacionado à erosão por precipitação é a permeabilidade dos solos que influencia indiretamente na perda de solo e no padrão de desenvolvimento de processos erosivos ao longo de uma encosta (ZACHAR, 1982).

Além disso, segundo o autor, a energia cinética das gotas de chuva aumenta à medida que o diâmetro das gotas também aumenta. Gotas de chuva com diâmetro maior reduzem a permeabilidade do solo e, com isso, podem remover mais material.

5.1.3. Influência da cobertura vegetal

A cobertura vegetal tem participação significativa no ciclo hidrológico, seja pelos processos de evapotranspiração ou pelo controle da erosão pelo contato direto das gotas de chuva com solo exposto (Figura 16).

A cobertura vegetal, segundo Infanti Junior & Fornasari Filho (1998), também tem seu importante papel para amenizar a erosão. Este tipo de cobertura impede o contato direto da água das chuvas com o solo, neste caso, a absorção de água pelo solo não é um processo acelerado, mas sim, lento e que pode diminuir os efeitos da erosão (JORGE & UEHARA, 1998).

Com a cobertura vegetal que impede o contato direto com o solo, as propriedades físicas que mantêm o solo coeso são pouco afetadas. Além disso, a cobertura vegetal impede que a água superficial escoe rapidamente e cause uma remoção acelerada do material superficial (ZACHAR, 1982).

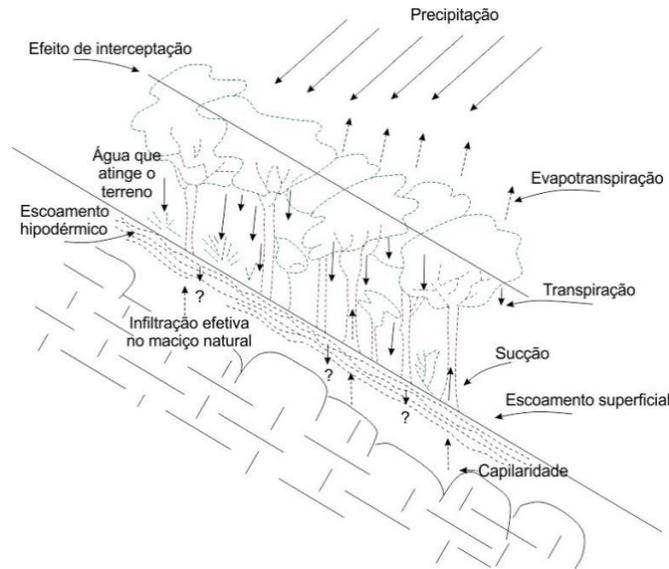


Figura 16 – Papel da cobertura vegetal no ciclo hidrológico (Adaptado de Jorge & Uehara, 1998).

Quando há a remoção da cobertura vegetal e conseqüente contato direto do solo com a água das chuvas, há aumento na infiltração de água e também na formação de cavidades. A água da chuva penetra em alta velocidade em um solo arenoso totalmente exposto e começa a remover as partículas de argila, que serviam de cimento agregador dos grãos. Com isso, a água acaba por ter o fluxo concentrado em subsuperfície e cada vez mais os *pipes* podem ser expandidos.

Solos com cobertura vegetal impedem a infiltração da água pluvial em alta velocidade e, conseqüentemente, com menor energia cinética. Com isso, mesmo em solos com porosidade elevada não há processos erosivos de grande intensidade (Figura 17).

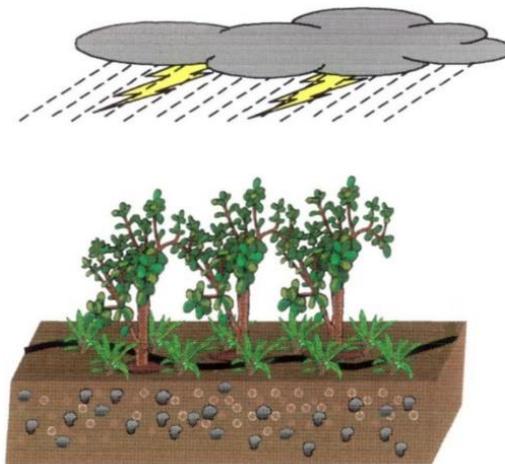


Figura 17 – Ação de água pluvial sobre solo com vegetação (Adaptado de Macedo *et al.* 1998).

5.1.4. Influência do relevo

A declividade do terreno é um fator que influencia nos processos erosivos, (INFANTI JR & FORNASARI FILHO, 1998). A declividade acentuada proporciona maiores velocidades do escoamento e da capacidade erosiva.

A vertente mais inclinada resulta no aumento da energia cinética no escoamento superficial, com conseqüente remoção e transporte das partículas. Segundo Zachar (1982), o solo fica instável sob um fluxo mais intenso, onde a remoção de partículas é mais efetiva. Segundo o autor, terrenos com alta declividade apresentam perdas maiores de solo, embora o volume de chuvas também seja importante.

Contudo, uma vertente pouco inclinada pode apresentar elevada capacidade erosiva, desde que a água tenha grande vazão e a vertente apresente uma grande extensão (MOREIRA & PIRES NETO, 1998). Ao atingir o final do trajeto, mesmo com uma baixa inclinação, o fluxo d'água terá atingido uma elevada velocidade e, conseqüentemente, elevada energia cinética. Com a elevada energia, a perda de solo é maior.

5.1.5 Influência do substrato rochoso e do solo em processos erosivos

O substrato rochoso e a composição dos solos também são relevantes em processos erosivos. A maior parte das ocorrências de voçorocas está associada a substratos de rochas sedimentares arenosas e respectivos solos de alteração, embora, haja casos em rochas xistosas e graníticas (INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

A granulometria do solo é fundamental em processos erosivos. Solos com textura arenosa são normalmente porosos e permitem a rápida infiltração e reduz o escoamento superficial. Além disso, apresentam baixa proporção de partículas argilosas, algo que facilita a remoção mesmo por pequenas enxurradas.

Solos rasos também são mais suscetíveis à erosão, pois ocorre rápida saturação dos horizontes superficiais e conseqüente aumento da incidência de processos erosivos (INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

5.1.6 Métodos de investigação de processos erosivos

Estudos de um ambiente que passa por processos erosivos requerem uma caracterização geológico-geotécnica. Os estudos devem visar a distribuição dos materiais que compõem o local, seus parâmetros físicos, técnicas mais adequadas para intervenções no terreno, etc. A análise pode ser desenvolvida por meio de métodos diretos e indiretos (SOUZA, SILVA, IYOMASA, 1998).

Dentre os métodos diretos, é possível citar o mapeamento geológico local como principal. Com ele é viável a caracterização das rochas locais e a identificação de estruturas visíveis no campo.

Já os métodos indiretos abrangem ferramentas para identificar a distribuição e o posicionamento de corpos geológicos, suas características físicas e tecnológicas, de maneira indireta. Nos métodos indiretos de investigação, está inserida a geofísica aplicada (SOUZA, SILVA, IYOMASA, 1998).

5.2 Geofísica Aplicada

A geofísica aplicada abrange métodos de investigação que permitem a caracterização em superfície de materiais situados em subsuperfície, por meio de suas propriedades físicas como densidade, resistividade e condutividade elétricas, magnetismo, etc.

Os métodos podem ser potenciais como a Gravimetria e a Magnetometria, eletromagnéticos como o Radar de Penetração no Solo (GPR) e elétricos como Eletorresistividade, Potencial Espontâneo e a Polarização Induzida.

Alguns desses métodos medem propriedades físicas naturais dos materiais em subsuperfície, sem a necessidade de intervenções externas, como a identificação de anomalias gravimétricas na Gravimetria e o potencial elétrico natural do Potencial Espontâneo.

Por outro lado, há investigações geofísicas que necessitam da intervenção de uma fonte externa, como no caso dos métodos sísmicos para medir as velocidades de propagação de ondas sísmicas no subsolo. Além destes, no caso do método da Eletorresistividade há a necessidade de injeção de corrente elétrica em subsuperfície para medições de valores de resistividade elétrica.

5.2.1 Resistência Elétrica e Resistividade Elétrica

Resistência elétrica é a medida da dificuldade da passagem de corrente elétrica por um determinado material e é expressa pela Lei de Ohm (Equação 1):

$$V = R \cdot I \quad (\text{Equação 1})$$

A unidade da resistência R é dada em ohms (Ω), é medida com a aplicação de uma corrente em ampères (A) e tensão em Volts (V). A resistência elétrica de um material para uma corrente que flui entre faces opostas em um metro cúbico de material permite o cálculo da resistividade (ρ) que é expressa em Ohm.m ($\Omega \cdot m$) (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

A resistência elétrica de um bloco retangular ou prismático para uma corrente que flui entre faces opostas é diretamente proporcional à resistividade e à distância L entre as faces e, inversamente proporcional à área da seção transversal S (Figura 18) (MUSSETT & KAHN, 2000; MILSOM & ERIKSEN, 2011). Com esse modelo e a aplicação da Lei de Ohm, é obtida a seguinte relação entre resistência (R) e resistividade (ρ) nas equações 2 e 3:

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

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (\text{Equação 3})$$

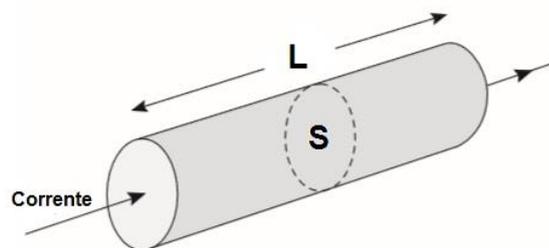


Figura 18 – Modelo ideal de eletorresistividade (adaptado de Mussett & Kahn, 2000)

O valor da resistência é diretamente proporcional ao comprimento de uma seção, isto é, o dobro da extensão L de uma seção, acarreta no dobro de

resistência. Porém, caso haja o aumento da área da seção transversal, a resistência diminui na mesma proporção (MUSSETT & KAHN, 2000).

Caso haja a propagação da corrente elétrica abaixo da superfície da crosta terrestre, há a geração de superfícies equipotenciais em um semi-espço (Figura 19).

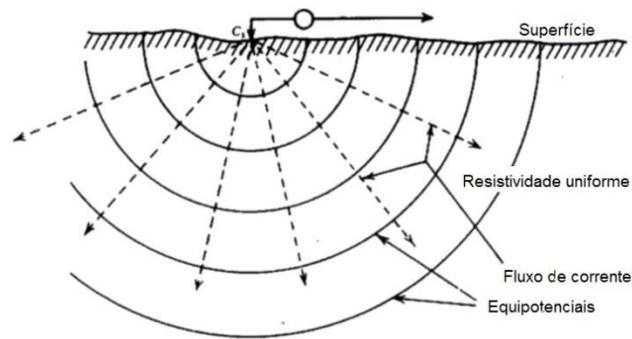


Figura 19 – Propagação de corrente elétrica e geração de superfícies equipotenciais em um semi-espço (Adaptado de TELFORD, GELDART, SHERIFF, 2004).

A aplicação da equação 2 no semi-espço define a equação 4 em que:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (\text{Equação 4})$$

Ao substituir a equação 4 na equação 1, é obtida a Equação 5:

$$\rho = 2\pi r \left(\frac{V}{I} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Em que o “r” é a distância entre o eletrodo que injeta corrente e o ponto em que há a medição do valor de resistividade.

5.2.2. Método da Eletrorresistividade

No método da Eletrorresistividade é utilizada uma fonte artificial para a injeção de corrente elétrica em subsuperfície que é conectada a um circuito representado

por um par de eletrodos A e B (MUSSETT & KAHN, 2000). A corrente flui no sentido de positivo para o negativo (Figura 20).

Para criar o circuito semelhante a uma bateria, é necessário manter as cargas positivas e negativas separadas umas das outras (terminais da bateria). Caso um condutor seja conectado entre esses terminais, a corrente flui para fechar um circuito (ROBINSON & ÇORUH, 1988).

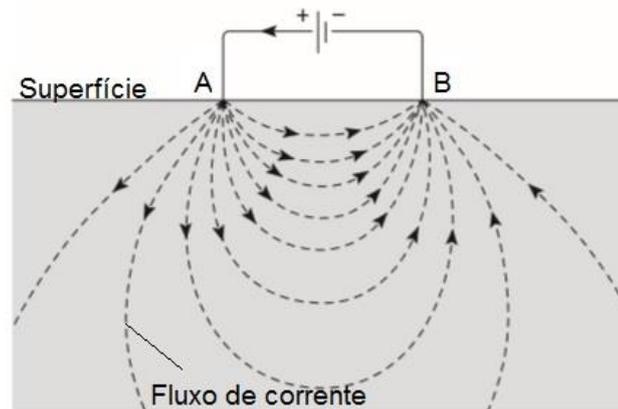


Figura 20 – Propagação de corrente elétrica em subsuperfície (Adaptado de MUSSETT & KAHN, 2000)

A figura 20 ilustra a propagação de corrente elétrica em um meio condutor homogêneo. Entretanto, superfície da Terra é constituída por diferentes materiais com diferentes capacidades de conduzir corrente elétrica e alguns com valores elevados de resistividade, além da resistência de contato entre os eletrodos poder influenciar nos valores calculados de resistividade elétrica.

Para isso, é necessário um outro par de eletrodos para realizar a medição da diferença de potencial (ΔV) gerada pela passagem da corrente (KEAREY, BROOKS, HILL, 2002; KNÖDEL, LANGE, VOIGT, 2007). Este par de eletrodos recebem no nome de M e N (Figura 21).

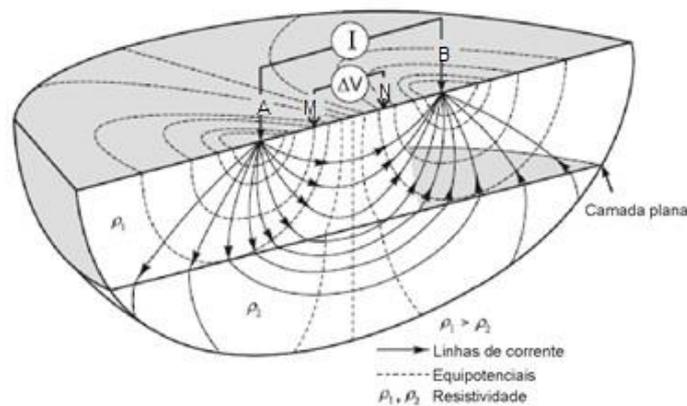


Figura 21 – Circuito para medição de valores de resistividade elétrica (Adaptado de Knödel, Lange, Voigt, 2007).

Pela figura 21, a corrente elétrica ao encontrar uma interface entre camadas tende a sofrer refração. Com isso, ela é propagada de maneira distinta em diferentes camadas em subsuperfície. O resultado é variações das diferenças de potencial medidas de acordo com cada camada em que a corrente é propagada.

Os modelos para a aplicação do método da Eletrorresistividade foram elaborados em consideração a solos homogêneos ou semi-espaços homogêneos (TELFORD, GELDART, SHERIFF, 2004; MILSOM & ERIKSEN, 2011). A superfície da Terra não é um meio homogêneo e, portanto, uma mesma rocha pode apresentar variações de valores de resistividade elétrica.

Para adequar os dados medidos em campo para o modelo ideal da Eletrorresistividade foi definida a resistividade aparente (ρ_a). Essa resistividade é um conceito formal que não pode ser considerada como uma média das resistividades do material em subsuperfície. Ela é calculada com a aplicação de um fator geométrico K , determinado a partir do espaçamento entre eletrodos ABMN (Equações 6 e 7) (PARASNIS, 1972; MILSOM & ERIKSEN, 2011;).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Equação 6})$$

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{Equação 7})$$

Em meios heterogêneos (mais comuns nos trabalhos de campo), o método da eletrorresistividade pode ser eficaz para determinar contatos litológicos, além de estruturas como falhas, diques, etc. (TELFORD, GELDART, SHERIFF, 2004).

Em caso de cavidades vazias (apenas com ar) são esperados resultados de resistividade mais elevada quando comparada com o solo. Porém, em período de chuvas, essas cavidades podem estar preenchidas com água e, neste caso, valores baixos de resistividade elétrica são esperados.

5.2.3 Eletrodos e arranjos utilizados

Os eletrodos devem ser constituídos por materiais resistentes à corrosão e que permitam a passagem de corrente elétrica com facilidade, como alumínio por exemplo. Devem ter um comprimento significativo (cerca de 0,50m) para que possa penetrar solo a dentro e garantir um bom contato elétrico. Além disso, em caso de superfícies extremamente secas, é recomendável a umidificação com água dos eletrodos (TELFORD, GELDART, SHERIFF, 2004). Os eletrodos devem ser fixados no solo de acordo com o espaçamento estabelecido pelo arranjo a ser utilizado.

Os arranjos utilizados para realizações de medidas de resistividade elétrica influenciam nos resultados calculados, não apenas pelo fato do uso do espaçamento entre eletrodos para o cálculo da resistividade aparente, como também pela profundidade de investigação a ser atingida e pela precisão dos resultados obtidos. Para este trabalho foi escolhido o arranjo combinado Wenner-Schlumberger.

Esse arranjo combinado possui boa relação sinal/ruído, boa resolução para identificação de variações laterais e os eletrodos de leitura estão inseridos em meio à propagação da corrente elétrica.

O arranjo Wenner foi empregado no primeiro nível de investigação que corresponde aproximadamente à profundidade cujo valor é metade do espaçamento entre os eletrodos (GANDOLFO, 2007).

No arranjo Wenner, os eletrodos são fixados ao longo de uma mesma linha e possuem o mesmo espaçamento (a) entre si (TELFORD, GELDART, SHERIFF *et al.*, 2004). Para medições de resistividade elétrica que variam lateralmente o espaçamento é mantido constante ao longo de toda a linha. Para aumentar a profundidade de investigação, o espaçamento entre os eletrodos é aumentado na mesma quantidade (Figura 22) (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

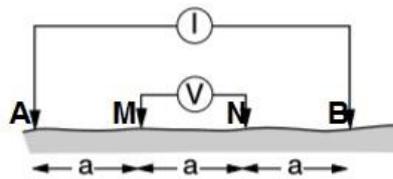


Figura 22 – Arranjo Wenner em que “a” é o espaçamento entre os eletrodos (MILSOM, 2003).

Para este arranjo, o fator geométrico K é dado por: $2\pi a$.

A utilização deste arranjo é recomendável em áreas com ruídos, pois há uma elevada contribuição no sinal, além de boa resolução vertical (MILSOM & ERIKSEN, 2011). Contudo, com o aumento constante do espaçamento entre eletrodos, medidas em profundidades maiores podem apresentar resultados não muito precisos.

No arranjo Schlumberger, os eletrodos são fixados ao longo de uma mesma linha, mas com espaçamentos variados, de forma que entre os eletrodos de corrente AB haja maior espaçamento que entre os eletrodos MN (Figura 23).

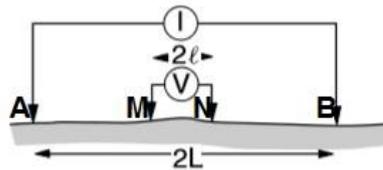


Figura 23 – Esquema do arranjo Schlumberger (adaptado de Milsom, 2003).

Para este arranjo, o fator geométrico K é definido por: $\pi \frac{L^2 - l^2}{2l}$.

Para medições na mesma profundidade, os eletrodos são movidos com a manutenção da configuração inicial do espaçamento. Caso haja a necessidade de aumento da profundidade de investigação, inicialmente, apenas os eletrodos de corrente são mais afastados (TELFORD, GELDART, SHERIFF, 2004; MILSOM & ERIKSEN, 2011).

Porém, a medida que os eletrodos de corrente ficam mais afastados, a diferença de potencial adquire valores baixos para ser medida com precisão pelo circuito receptor MN. Neste caso, os eletrodos M e N também são afastados entre si. Este arranjo é recomendável para identificação de alvos que requerem boa resolução vertical e lateral (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

5.2.4 Técnica do Imageamento Elétrico e aplicações

O imageamento elétrico consiste na utilização dos arranjos de eletrodos dispostos ao longo de uma linha para a elaboração de uma pseudo-seção de distribuição de valores de resistividade elétrica com a profundidade (Figura 24). Na Europa, Ásia e Austrália, o imageamento elétrico pode ser conhecido como Tomografia Elétrica (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

Nesta técnica o espaçamento dos eletrodos pode ser mantido constante ou não durante a aquisição de dados.

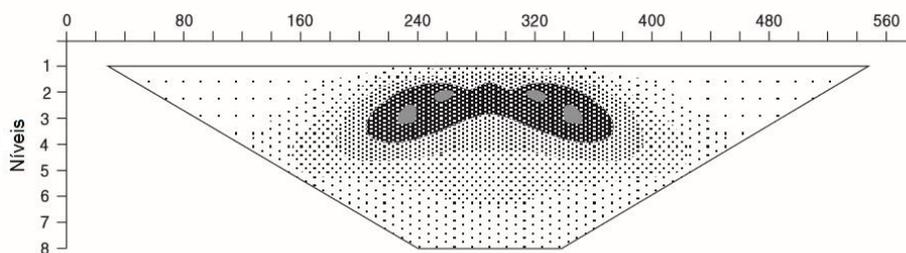


Figura 24 – Pseudo-seção esquemática de valores de resistividade elétrica (Adaptado de MUSSETT & KAHN, 2000)

A pseudo-seção indica a distribuição dos valores de resistividade elétrica em subsuperfície de acordo com as profundidades investigadas. A elaboração da pseudo-seção é realizada pelo processamento dos dados obtidos em campo e posteriormente pode resultar em modelos de inversão (Figura 25). Como resultado do processamento, é possível identificar a profundidade máxima investigada, variação de resistividade elétrica e sua distribuição espacial em subsuperfície.

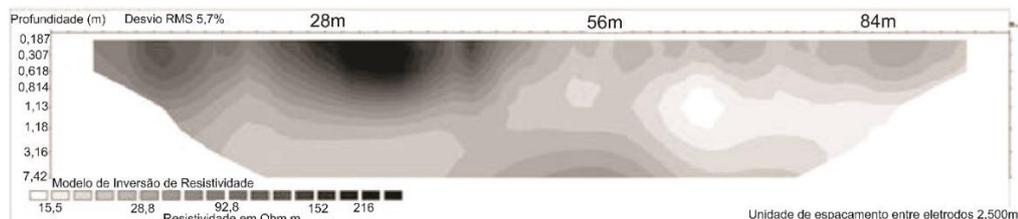


Figura 25 – Modelo de inversão esquemático de resistividade elétrica (adaptado de MILSOM & ERIKSEN, 2011).

A análise de modelos de inversão de imageamento elétrico permite a identificação de variações laterais dos parâmetros físicos, de estruturas que ocorrem perpendicularmente às linhas de caminhamento, etc.

Dentre as principais aplicações da técnica estão a detecção das variações de resistividade decorrentes da presença de contatos geológicos, zonas com plumas de contaminação, veios mineralizados, estruturas preenchidas com fluidos ou com ar como cavidades, etc. (MUSSETT & KAHN, 2000; TELFORD, GELDART, SHERIFF, 2004).

O imageamento elétrico pode ser realizado em mais de uma linha. Portanto, os resultados dos diversos imageamentos elétricos podem ser interpolados e também podem mostrar a variação do parâmetro medido em termos bidimensionais. Alguns trabalhos mostraram a aplicação do imageamento elétrico ou tomografia elétrica para a detecção de cavidades.

No trabalho de Dourado *et al.* (2001), foram utilizados três métodos geofísicos para a detecção de cavidades nas bancadas de uma mineração no município de Descalvado-SP. Segundo os autores, a escolha dos métodos de Radar de Penetração no Solo (GPR), eletrorresistividade e gravimetria foi feita com base nos contrastes das propriedades físicas a serem oferecidas pelo solo e pelas cavidades. As cavidades foram mapeadas com baixa assinatura gravimétrica e mais resistivas que o solo. Em relação ao GPR, feições hiperbólicas corresponderam às cavidades em subsuperfície.

O trabalho de Ahmed *et al.* (2003), realizado na região centro-leste do Estado de Illinois (EUA), mostra a precisão das medidas eletromagnéticas e de resistividade elétrica para a detecção de sumidouros associados a *pipes* e fraturas do corpo rochoso. Para as medidas de resistividade elétrica foram utilizados os arranjos Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo. Com os valores obtidos de resistividade foi possível identificar zonas que apresentavam cavidades no subsolo. Os dados eletromagnéticos foram utilizados com a finalidade de encontrar as zonas em que a condutividade elétrica era elevada, isto é, em que é esperado encontrar sumidouros preenchidos com água e *pipings* ativos. Mais próximo da superfície, os valores elevados de resistividade elétrica remeteram a *pipings* sem a presença de águas, que não estavam ativos na época.

No trabalho de Silva Júnior *et al.* (2006), foram aplicados os métodos de eletrorresistividade (arranjo dipolo-dipolo), polarização induzida e gravimetria. O

estudo foi realizado em Almirante Tamandaré (PR), e visava avaliar a aplicabilidade dos métodos para investigação de regiões cársticas, onde houve casos de abatimento do terreno. Anomalias gravimétricas de baixa intensidade foram interpretadas como fraturas, cavidades ou cobertura aluvionar. A eletrorresistividade e a polarização induzida forneceram resultados de que corpos mais condutores apresentavam cavidades preenchidas com água.

No trabalho de Pánek *et al.* (2010) foi aplicada a tomografia elétrica nas Montanhas Beskidy, Polônia, para a detecção de cavidades. Os resultados esperados estavam relacionados aos contrastes de valores de resistividade elétrica; muito resistivos corresponderiam a cavidades preenchidas com ar ou camada superficial de solo; resistividade mais baixa corresponderiam ao substrato rochoso, solo, etc.

O trabalho de Lazzari *et al.* (2010) mostra a aplicação de métodos geofísicos para detecção e reconstrução de cavidades na voçoroca da vila de Rabatana, sudeste da Itália. O local de estudo contém uma voçoroca de grande extensão que contém cavidades próximas da superfície que oferecem riscos de desabamentos, deslizamentos, etc. Os dados geofísicos foram adquiridos com a tomografia elétrica e GPR. Foram geradas pseudo-seções de resistividade em que foram reconhecidas anomalias de elevada e baixa resistividade elétrica; as elevadas foram interpretadas como cavidades preenchidas com ar e as baixas como preenchidas com água. Com os dados de GPR foi possível confirmar a existências das cavidades. A integração com dados preliminares permitiu a elaboração de mapa que mostra a evolução das cavidades em uma das margens da voçoroca.

No trabalho de Martínez-Pagán *et al.* (2013), foi aplicado o método da eletrorresistividade com a finalidade de detectar a presença de cavidades de minas rasas sob o solo em Cartagena, Espanha, por meio de quatro perfis de tomografia elétrica. Os resultados permitiram a divisão dos perfis em duas unidades: a superior com valores baixos de resistividade elétrica e a inferior com valores mais elevados. Além dos perfis geofísicos, perfis esquemáticos sobre a geologia local e suas estruturas foram desenhados para serem comparados com as anomalias geofísicas. O produto dessa comparação foi a correlação entre zonas mais resistivas com as cavidades preenchidas com ar. Com o conhecimento dos autores sobre a geologia local, algumas zonas resistivas foram associadas também a corpos mineralizados na área ou simplesmente com as rochas que ocorrem localmente.

6. AQUISIÇÃO DE DADOS

Um estudo prévio foi realizado na área para verificar quais seriam os melhores arranjos para a identificação das cavidades em subsuperfície (FRANZINI, 2015). O objetivo do trabalho foi identificar qual o melhor arranjo para a detecção de cavidades naturais com a utilização da Eletrorresistividade e foram testados os arranjos Wenner, Schlumberger e Dipolo-dipolo em que o arranjo Schlumberger apresentou os resultados mais satisfatórios. As cavidades foram apresentadas em pseudo-seções com forma semi-arredondada e valores de baixa resistividade elétrica.

Com base nos resultados obtidos no estudo prévio, foi adotada a técnica de imageamento elétrico por meio do arranjo Wenner-Schlumberger. O arranjo Wenner foi utilizado para a aquisição de medidas de resistividade elétrica no primeiro nível, pois os eletrodos estão dispostos com a mesma distância (1 metro) entre si. O arranjo Schlumberger é utilizado nas medidas dos níveis abaixo do primeiro, devido a sua melhor precisão de aquisição de dados em profundidades maiores.

Como o objetivo não é apenas a detecção de *pipes*, mas também procurar identificar a sua ocorrência em uma área, foram realizadas 6 linhas de 84m de imageamento elétrico em diferentes níveis do aterramento da voçoroca (Figuras 26 e 27). Entre cada linha (L1 a L6), foi estabelecido o espaçamento de cinco metros (Figura 28). A disposição das linhas em campo foi realizada com a utilização de quatro bobinas com 21 entradas cada uma e 84 eletrodos a serem fixados no solo.

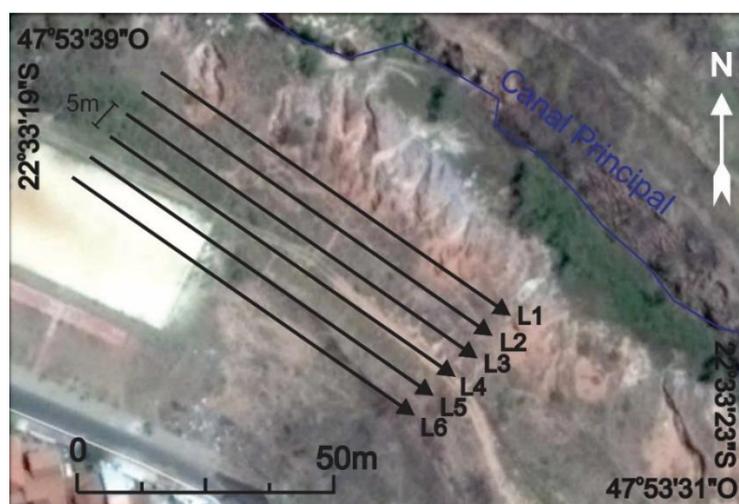


Figura 26 – Vista aérea das linhas de aquisição de dados geofísicos: linha 1 (L1) a linha 6 (L6). (Adaptado de Google Earth, 2014).

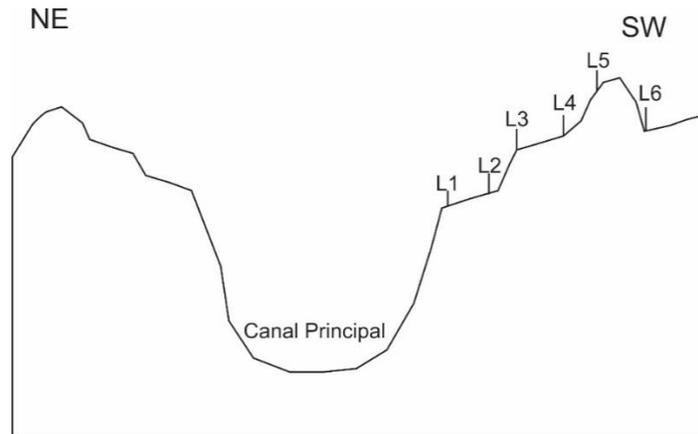


Figura 27 – Perfil esquemático sem escala com a visualização da posição das linhas de aquisição em relação ao canal principal da voçoroca (arquivo pessoal).

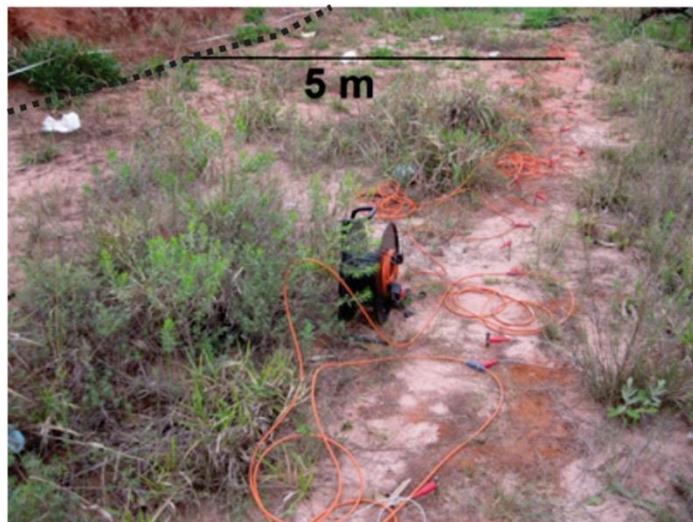


Figura 28 – Espaço entre as linhas de imageamento elétrico (arquivo pessoal).

Os *pipes* possuem diâmetros que variam de 20cm a 60cm. Desta forma, foi adotado o espaçamento entre cada eletrodo de 1 metro.

Os dados de resistividade foram coletados com a utilização do resistímetro Terrameter LS, equipamento que permite leituras de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial elétrico natural, de forma automática, a partir de uma programação prévia (Figura 29).



Figura 29 – Terrameter LS (Arquivo pessoal).

6.1 Processamento dos dados geofísicos

Os dados geofísicos foram processados no programa Res2Dinv, desenvolvido pela Geotomo *Software*. Ele permite a elaboração de pseudo-seções e modelos de inversão 2D de imageamento elétrico. O programa foi desenvolvido para inversão de grande quantidade dados (de 200 a 21000) com um sistema de diversos eletrodos (de 25 até 16000 eletrodos).

A disposição do modelo de inversão mostra, além da variação do parâmetro físico, a profundidade máxima investigada, espaçamento entre eletrodos e o desvio RMS. Sua elaboração considera variações nas escalas vertical e horizontal (sobreelevação), escalas de cor, efeito de topografia, etc.

O modelo 2D utilizado pelo programa subdivide a subsuperfície em um determinado número de blocos retangulares (Figura 30). O propósito é determinar a resistividade aparente em cada bloco que produzirá uma pseudo-seção de acordo com as medidas realizadas. Para os arranjos Wenner e Schlumberger, a espessura da primeira camada é determinada como a metade do espaçamento dos eletrodos. As espessuras das camadas mais profundas subsequentes são acrescidas de 10% a 25% (GEOTOMO, 2003).

O programa utiliza o algoritmo de mínimos quadrados, em que há a tentativa de reduzir os desvios entre os valores de resistividade elétrica calculados e os medidos, diferença expressa em porcentagem de desvio RMS. Porém, um modelo de inversão com um RMS baixo não necessariamente significa coerência com a realidade.

Arranjo de modelo de bloco e pontos de dado de resistividade

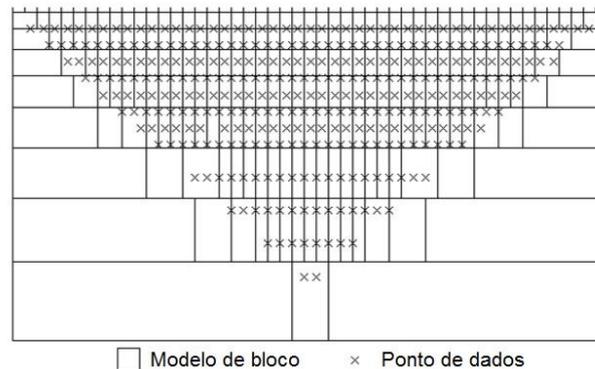


Figura 30 – Blocos retangulares e pontos de dados de resistividade aparente (adaptado de Geotomo, 2003).

Para a integração dos dados obtidos no imageamento elétrico, foi utilizado o programa Oasis Montaj, da plataforma Geosoft. Ele possui uma ampla capacidade para integração de dados e visualização de superfícies, diversos tipos de processamento, análises, etc (GEOSOFT, 2013).

No programa é possível produzir mapas com dados geofísicos ou simplesmente gerar superfícies de visualização, que podem contar ou não com dados de topografia. Para a geração das superfícies é necessária a orientação por coordenadas (X, Y e Z).

Os dados dos modelos de inversão foram reunidos em uma planilha com a posição das leituras ao longo das linhas (variável X), espaçamento entre as linhas (variável Y), profundidade (variável Z) e a resistividade (variável R).

O resultado foi tabelado e modelado em termos 2D e interpolado em termos 3D. Cada ponto do modelo 3D foi transformado em um bloco, com dimensões condicionadas a critérios estatísticos e de malha amostral.

Esta malha foi planejada com o objetivo de interpolação lateral das linhas a partir do algoritmo geoestatístico de mínima curvatura, com auxílio do programa Oasis Montaj, com geração de níveis para diversas profundidades.

Este algoritmo foi escolhido devido a possibilidade de geração de superfícies de suavização fiéis aos dados originais, além de limitar os valores máximo e mínimo aos pontos amostrados (MEDINA & QUINTAS, 2008).

Após a visualização de todas as superfícies interpoladas, foram selecionadas apenas duas profundidades (2m e 3m), relacionadas aos níveis ocorrência das cavidades em subsuperfície.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Apresentação e discussão dos modelos de inversão

Foram gerados 6 modelos de inversão de resistividade elétrica após o processamento dos dados de campo. As seções de 1 a 6 (L1 a L6) estão mostradas nas figuras 31 a 36. A seção 1 foi realizada a, aproximadamente, um metro de distância da lateral da voçoroca. As seções sucessivas foram realizadas com a distância de 5 metros uma da outra.

Os valores de resistividade elétrica foram expressos em diferentes tonalidades de cor, em que as cores quentes representam maior resistividade e as cores frias, menor resistividade.

As seções geradas mostraram uma grande variação de valores, entre 300 $\Omega.m$ e superiores a 16000 $\Omega.m$, com processamento em escala logarítmica para realce dos extremos e tornar evidente a ocorrência de cavidades. Os desvios RMS de cada seção estão com baixos valores, o que significa que existe uma pequena variação entre o valor calculado no campo e no processado pelo software.

A seção 1 está situada próxima à borda do canal da voçoroca e das cavidades visíveis, em comparação com as demais seções (Figura 31). A partir de 42m da seção está localizada a região resistiva com valores acima de 9000 $\Omega.m$ e pouco abaixo (aproximadamente três metros de profundidade em relação à linha de estudo), há as regiões menos resistivas representadas por valores inferiores a 1000 $\Omega.m$ com formato circular.

Os valores resistivos podem ser relacionados às cavidades preenchidas com ar. Os valores menos resistivos logo abaixo correspondem a profundidades em que há rocha sã saturada com água.

Na seção 2, ocorrem valores de elevada resistividade elétrica acima de 9000 $\Omega.m$ em torno dos 10m a 20m do início da seção, além de apresentar setores de elevada resistividade em torno dos 42m de seção que podem ser relacionados com os obtidos na seção 1 (Figura 32). Essas assinaturas geoeletricas correspondem à continuidade em subsuperfície das cavidades detectadas na seção anterior.

Abaixo do horizonte com elevada resistividade elétrica, há valores menos resistivos com valores inferiores a 1000 $\Omega.m$ representado pela cor azul. Esses

valores podem ser relacionados aos da seção anterior (3m abaixo da superfície) e correspondem à rocha saturada em água.

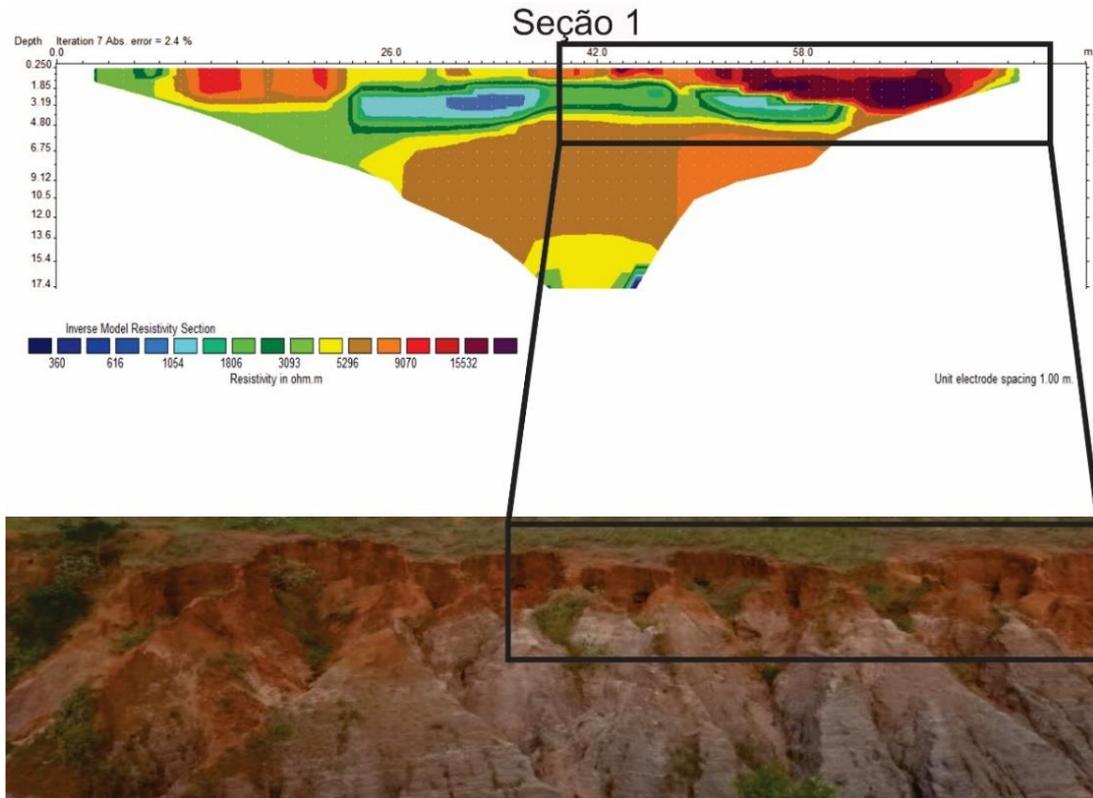


Figura 31 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 1 com sobrelevação de 1x e cavidades identificadas (arquivo pessoal).

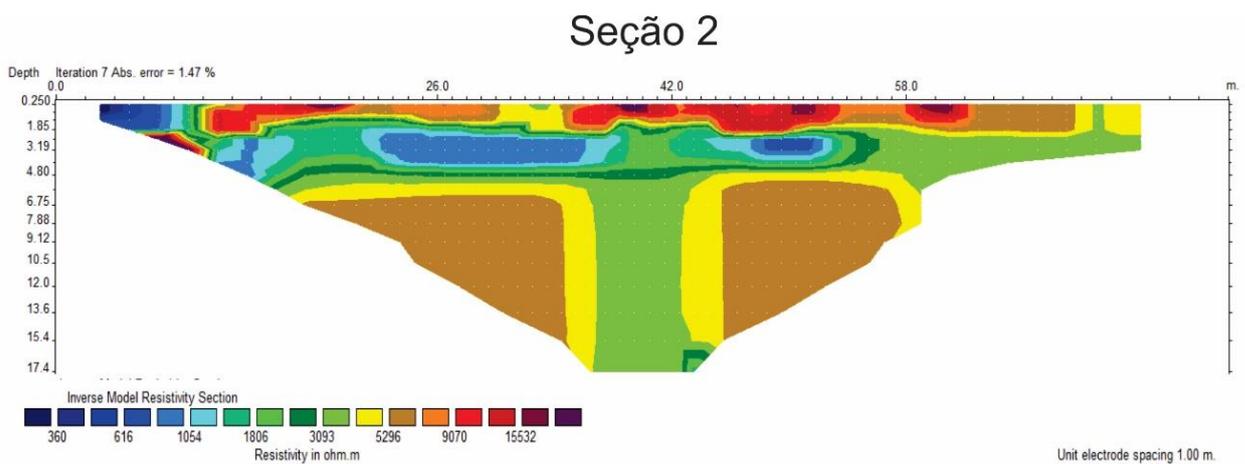


Figura 32 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 2 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).

Na seção 3, as regiões com valores elevados de resistividade começam a aparecer a partir dos 30m de imageamento na profundidade de 2 metros (Figura 33). Essas zonas apresentam maiores dimensões que na seção 2 e podem ser relacionadas com os valores obtidos nas seções anteriores. A seção mostrou que as cavidades detectadas na seção 1 apresentaram continuidade em subsuperfície e podem estar aglomeradas, o que resultou em valores mais elevados de resistividade elétrica (acima de 15000 Ω .m) em relação às seções anteriores.

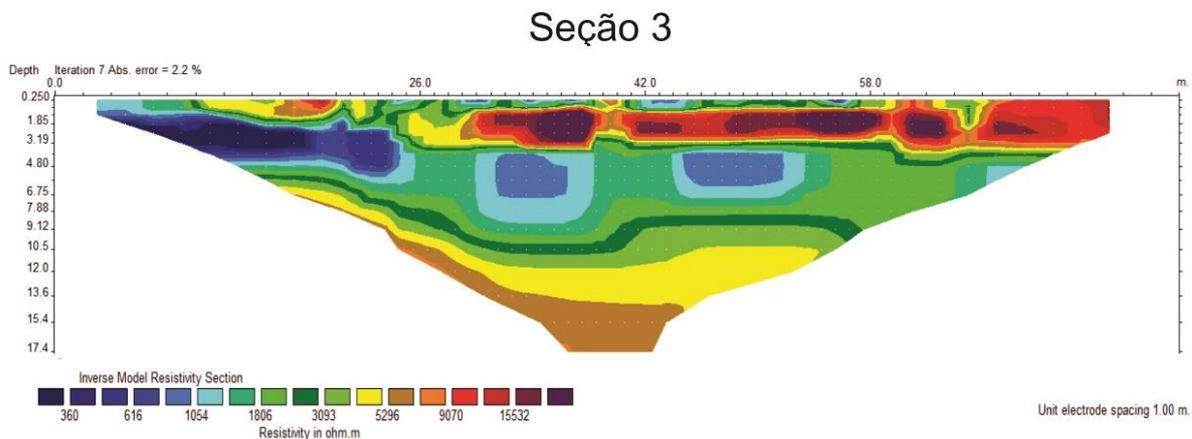


Figura 33 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 3 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).

Zonas de baixa resistividade são encontradas a partir dos 4 m de profundidade, que podem ser relacionadas à saturação também identificada em seções anteriores. O que difere é a presença de uma região menos resistiva no começo da seção (2m de imageamento) e em profundidade mais rasa (2m). Essa zona menos resistiva e mais extensa que as anteriores indicam maior saturação da rocha por água.

A seção 4 apresenta a maior variação dos valores de resistividade elétrica (Figura 34). A ocorrência de elevados valores de resistividade foi observada apenas na profundidade de 2 metros e em torno de 58m. Esses valores podem representar continuidade das cavidades em subsuperfície.

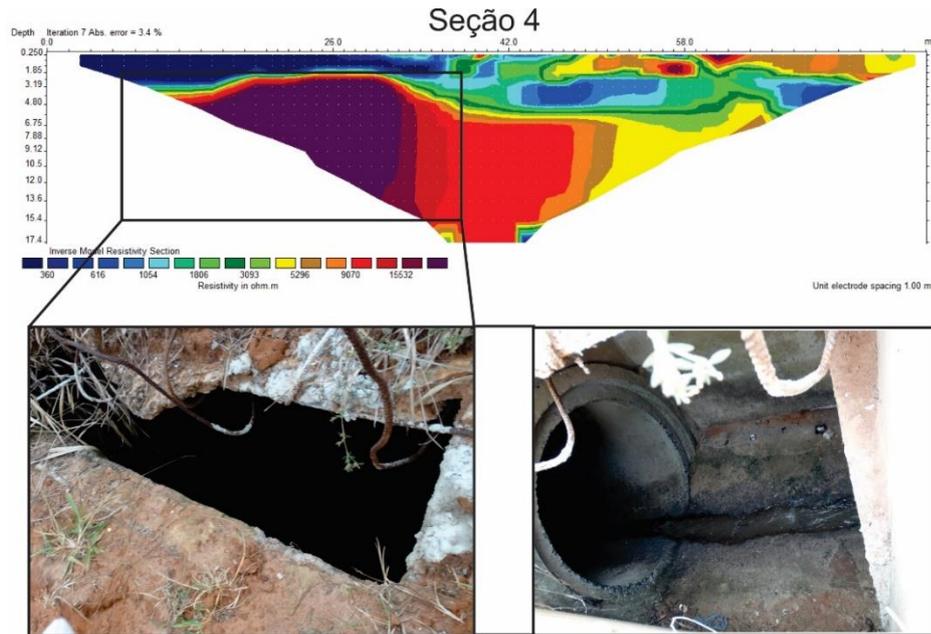


Figura 34 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 4 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).

A zona menos resistiva apresenta maiores dimensões que na seção anterior, além de mostrar continuidade por quase toda seção, em torno dos 3 metros de profundidade.

Diferentemente das seções anteriores, em torno dos 8m na superfície e 4 metros de profundidade, há o aparecimento de uma zona com valores elevados de resistividade elétrica. Esse surgimento pode ser explicado pelo fato de que a linha de aquisição de dados de imageamento elétrico cruzou uma tubulação instalada na voçoroca (Figura 34).

A tubulação possui cerca de 0,5m de diâmetro, é constituída por concreto e estava quase que em sua totalidade preenchida com ar, ou seja, materiais extremamente isolantes. Com base nisso, a corrente injetada em subsuperfície não conseguiu penetrar a tubulação para gerar diferença de potencial e nem atingir os materiais arenosos abaixo da tubulação.

Portanto, os valores abaixo do tubo de esgoto foram gerados como altamente resistivos (iguais aos da tubulação), diferentemente dos valores obtidos para o arenito nas mesmas profundidades em seções anteriores.

Na seção 5 é possível notar o aparecimento de dois horizontes: um com valores mais resistivos e outro com valores de baixa resistividade (Figura 35). O primeiro horizonte surge a partir de 26 metros na superfície e 2 metros de profundidade. Destes valores é possível observar correlação com todas as seções

anteriores apenas na zona em torno dos 58 metros. Os demais valores podem ser relacionados aos identificados nas seções de 1 a 3, mas devido à interferência detectada na seção 4, a região com elevada resistividade elétrica pode representar a continuidade das cavidades em subsuperfície.

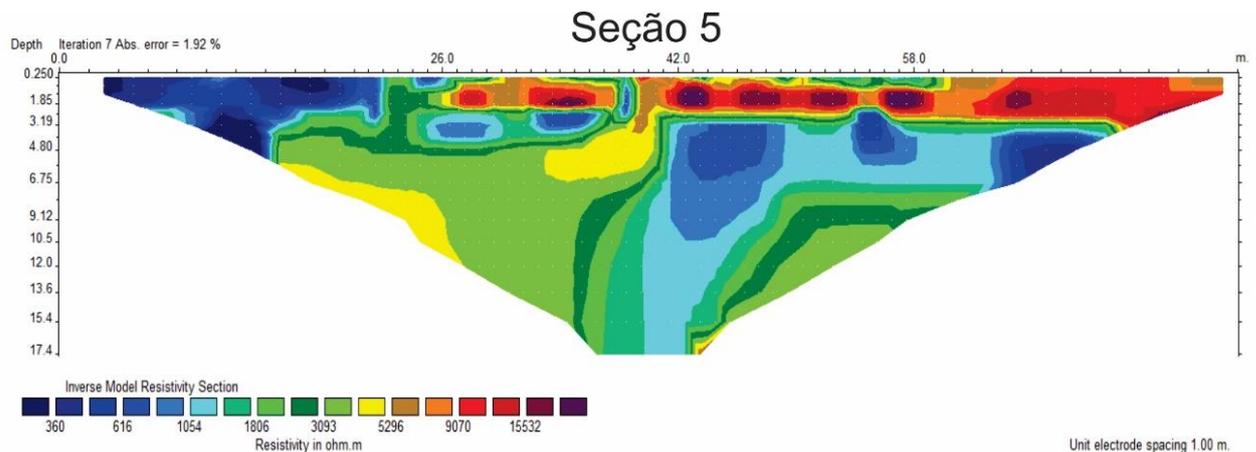


Figura 35 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 5 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).

O segundo horizonte ocorre entre 3 e 22 metros na superfície e 0,5 e 3 metros de profundidade. Esse horizonte é interrompido por valores de resistividade moderada a alta e retoma continuidade em torno dos 42 metros na superfície e 17 metros de profundidade. Esse horizonte amplo de valores de baixa resistividade elétrica indica maior saturação da rocha.

Na seção 6, nas porções mais próximas à superfície há valores baixos de resistividade elétrica que chegam até uma profundidade de aproximadamente 3 metros (Figura 36).

Abaixo deste horizonte, ocorrem valores mais elevados dos 26 aos 58 metros em extensão e aproximadamente 5 metros de profundidade, com valores superiores a 9100 Ω .m. Esses valores representam uma elevada concentração de cavidades em subsuperfície e podem ser relacionados aos valores das seções 5, 3, 2 e 1, mas não com os da seção número 4 (com esta apenas o valor em torno dos 58m de extensão). Abaixo da zona com valores de resistividade superiores a 9100 Ω .m, há um horizonte inteiramente menos resistivo, cujos valores são inferiores a 1000 Ω .m.

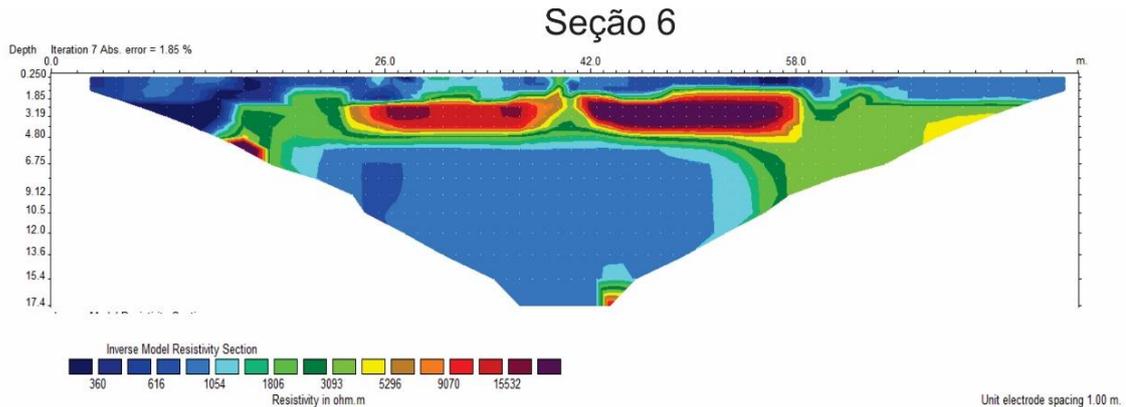


Figura 36 – Modelo de inversão de resistividade elétrica para a linha 6 com sobrelevação de 1x (arquivo pessoal).

De maneira geral, o material arenoso em subsuperfície apresentou maior saturação em água quando comparado às demais seções. Isto ocorreu pelo fato de que a linha 6 (L6) foi realizada em um setor da voçoroca com topografia plana (Figura 37).

Os valores de elevada resistividade não apresentaram grandes extensões, exceto por um ruído na seção 4. De maneira geral, os valores resistivos identificados na seção 1 foram correspondidos em outras seções, em distâncias semelhantes de imageamento e profundidades investigadas.



Figura 37 – Superfície plana em que foi realizada a linha 6 (arquivo pessoal).

Portanto, essa continuidade dos valores de elevada resistividade pode estar associada à presença de cavidades (*pipes*) e possíveis continuidades em subsuperfície. Os resultados corroboraram com os obtidos nos trabalhos de Dourado *et al.* (2001) e Lazzari *et al.* (2010).

O fato das seções apresentarem gradativamente valores menos resistivos pode ser explicado pelo fato de que o nível freático estava baixo na linha 1 e mais elevado na linha 6 (Figura 38). No caso, a linha 6 estava mais distante da borda da voçoroca e o nível d'água não estava rebaixado.

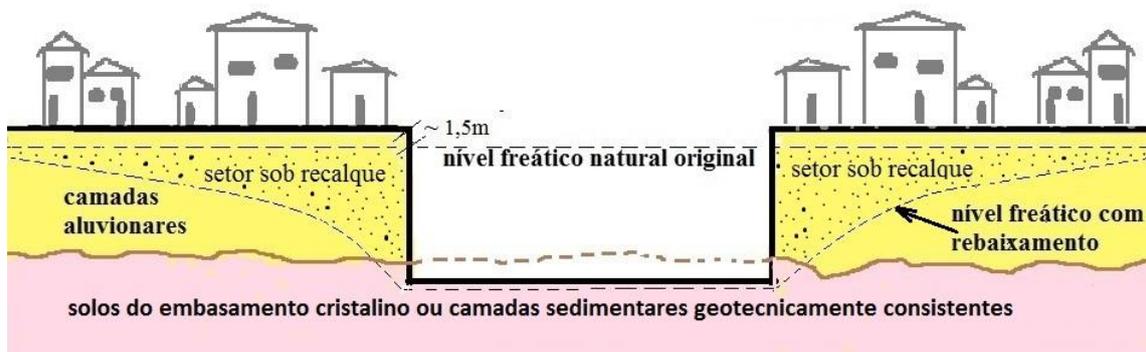


Figura 38 – Esquema de rebaixamento de nível freático (adaptado de Rodrigues, 2014).

7.2 Integração dos dados dos modelos de inversão

Os dados das seções geofísicas foram integrados de maneira a mostrar espacialmente como os valores resistivos estavam distribuídos em subsuperfície para 2m e 3m de profundidade. Os valores no eixo X indicam a posição do imageamento elétrico e no Y, a posição das linhas de aquisição de dados. As cores quentes representam valores elevados de resistividade elétrica ao passo que as frias, baixos valores (Figura 39). A seção 1 começa na intersecção dos valores zero para os eixos X e Y.

Com base na figura 39, é possível notar a distribuição espacial dos valores de resistividade elevada para dois metros (Figura 39a) e três metros (Figura 39b) de profundidade.

A figura 39a mostra a distribuição espacial dos valores de resistividade para a profundidade em que foi identificado o contato do solo com a rocha. Nela é possível notar que os valores de elevada resistividade aparecem com mais frequência a partir

da distância de 42 metros no eixo X e seguem até o fim da linha de imageamento elétrico.

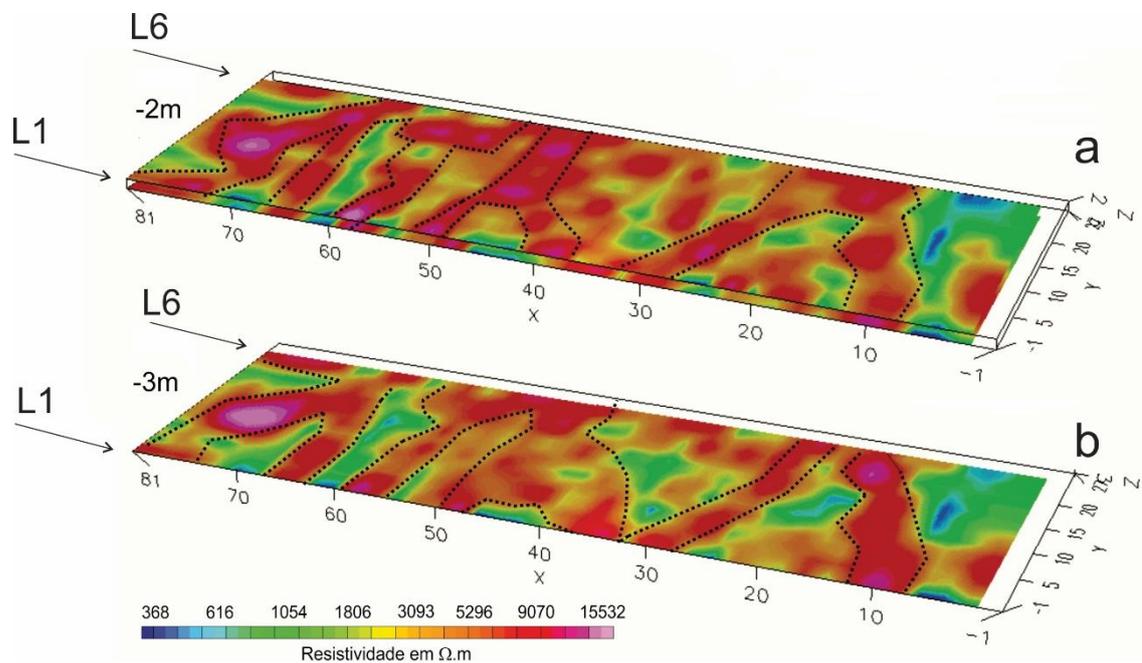


Figura 39 – Visualização em 3D dos valores de resistividade elétrica em subsuperfície em a) 2m de profundidade; b) 3m de profundidade (arquivo pessoal).

À medida que há o surgimento de seções sucessivas, é cabível inferir alguns prolongamentos de setores com valores elevados de resistividade elétrica. Esses prolongamentos podem indicar possíveis continuidades das cavidades (*pipes*) em subsuperfície.

É possível identificar que a partir da terceira linha de aquisição, as cavidades podem estar mais aglomeradas o que resultou em uma dimensão maior dos valores expressos nos modelos de inversão. Na última linha de aquisição, os valores de resistividade elevada estão praticamente aglutinados e podem representar uma aglomeração de cavidades.

Pela figura 39b, é possível notar que há menos valores de resistividade elevada no entorno da seção 1 quando comparado à figura 39a. Nas posições da seção 1 também é possível identificar mais setores com valores de resistividade elétrica inferiores a 1000 $\Omega.m$.

O prolongamento dos valores elevados de resistividade elétrica demonstra que as cavidades podem estar aglutinadas em subsuperfície, à medida que há um afastamento no eixo Y.

Quando comparada à figura 39a, é possível notar que há um aumento das dimensões de setores em que não há elevada resistividade elétrica. Isto pode ser explicado pelo fato de que a profundidade ilustrada de 3 metros está abaixo da identificada como a que contém as cavidades, isto é, as assinaturas geoeletricas estão mais influenciadas pela rocha do que pelo ar que preenche as cavidades e, em alguns setores, pela saturação por água.

De maneira geral, ambas figuras 39a e 39b mostram uma possível aglutinação das cavidades (*pipes*) em subsuperfície. Com a combinação aproximada do posicionamento das cavidades em relação às linhas de aquisição de dados, é possível inferir as localidades pelas quais passam as cavidades dos *pipes* (Figura 40).

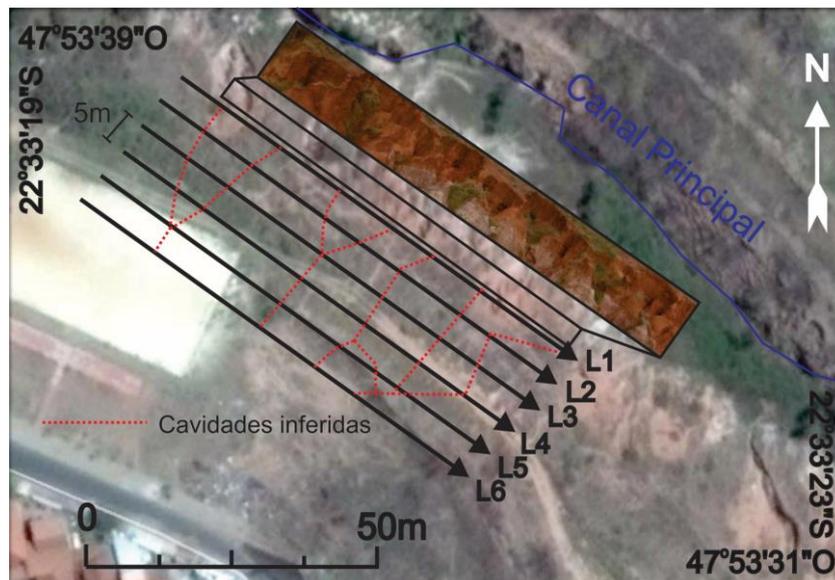


Figura 40 – Cavidades inferidas em relação às linhas de aquisição de dados (arquivo pessoal).

7.3 Recomendações para atenuação do processo erosivo

Uma das soluções possíveis seria provocar o assoreamento de forma natural em uma das cabeceiras da voçoroca. Com a construção de diques de menor porte, mas sucessivos de tamanhos cada vez maiores, o fluxo d'água começaria a perder energia (Figura 41).

A água passaria pelo primeiro dique e decantaria um pouco de material. Ao chegar no segundo dique, o fluxo terá sua energia reduzida e depositaria mais

material em suspensão. E assim sucessivamente até que não haja mais sobrecarga no ultimo dique de terra por parte do fluxo d'água.

Com a perda de energia do fluxo d'água combinada com a deposição do material em suspensão, além de evitar a sobrecarga em apenas um único dique (e evitar o seu rompimento), ajuda a assorear o canal da voçoroca e conter o processo erosivo causado pelo fluxo d'água no local.

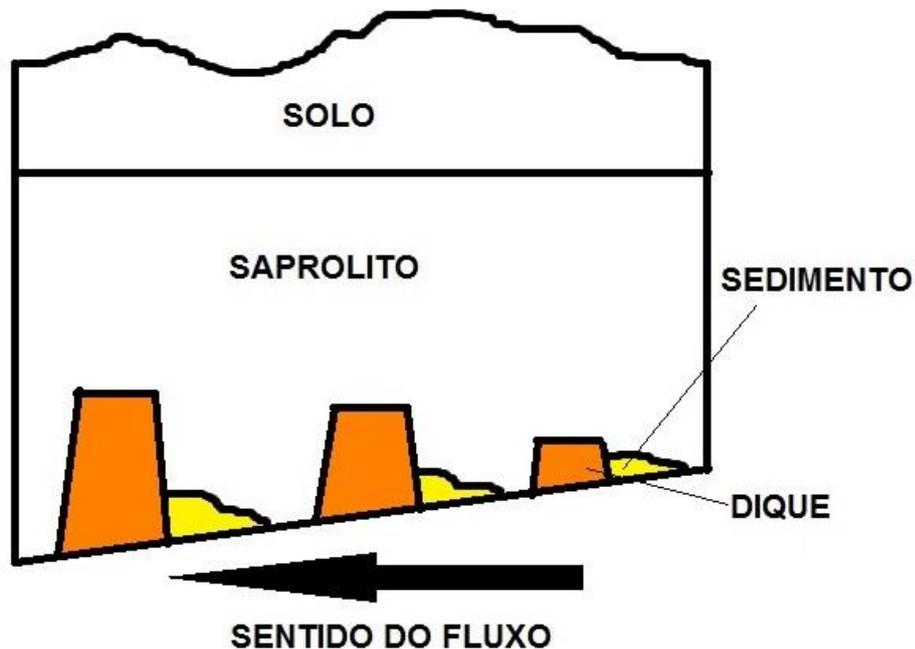


Figura 41 – Croqui representando os diques com sedimentação na base (Arquivo pessoal).

Juntamente com a solução apresentada da construção de diques, é interessante considerar o crescimento de vegetação. Construção de patamares com o aterramento em algumas partes da voçoroca permitem que haja o plantio de mata ciliar e vegetação rasteira, ou até mesmo o seu crescimento de forma natural. Em áreas mais íngremes ou instáveis é recomendado o plantio de bambu. Esta proposta solucionaria de vez o problema da região. Em casos em que haja a erosão interna do solo (*piping*), uma solução cabível consiste na captação e redirecionamento do fluxo interno da água. Seriam construídos sistemas de captação de água nas saídas das cavidades com redirecionamento à drenagem principal (rio) mais próximo (FILIZOLA *et al.* 2011).

8. CONCLUSÕES

Os dados geofísicos proporcionaram resultados satisfatórios, pois foi possível relacionar valores de elevada resistividade elétrica com locais em que há maior concentração de cavidades.

Para a detecção de cavidades em pequena dimensão, foi necessária a redução de espaçamentos entre eletrodos para que houvesse melhor resolução no resultado apresentado. Com isso, foi possível uma melhor identificação de feições que podem corresponder às cavidades.

Porém, nem todos os valores de elevada resistividade elétrica representaram cavidades vazias. Na seção 4, foi interceptada uma estrutura antrópica representada por uma tubulação de concreto pela qual passa esgoto, que foi prejudicial para a caracterização geoeletrica da linha 4. O material constituinte dificultou a propagação da corrente elétrica e resultou em valores irrealistas abaixo da profundidade em que a estrutura estava situada.

As linhas mais distantes do canal da voçoroca foram caracterizadas por valores de baixa resistividade elétrica abaixo dos 5m de profundidade. Esse fato pode ser atribuído ao nível freático mais raso, o que proporciona a redução dos valores de resistividade elétrica.

A integração dos valores de resistividade elétrica em mapas de isovalores proporcionaram o claro reconhecimento de continuidade lateral das cavidades, além da identificação de possíveis zonas de aglomeração de cavidades. Neste sentido, esta forma de processamento pode ser aplicada a estudos semelhantes.

Como o *piping* é um fenômeno dinâmico, o método da eletrorresistividade pode ser uma ferramenta útil para o monitoramento de sua evolução. Com a identificação do alcance das cavidades em subsuperfície, é possível tomar conhecimento do risco que as regiões adjacentes estão submetidas.

Este trabalho demonstrou a aplicabilidade da eletrorresistividade na caracterização de cavidades em solo e seu potencial de uso no planejamento e elaboração de projetos geotécnicos e recuperação de voçorocas.

Para o caso da área de estudos, algumas medidas de remediação de processos erosivos podem ser aplicadas, como a construção de diques de tamanhos sucessivos, para o assoreamento natural do canal durante o período de chuvas.

9. REFERÊNCIAS

- 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, Illinois, EUA, Vol 44, Issue 6, p. 705-716, Maio de 2003.
- ALMEIDA, F.F.M.; MELO, M. S. **A Bacia do Paraná e o Vulcanismo Mesozóico.** São Paulo, 1981.
- ALMEIDA FILHO, G.S.; SANTORO, J.; GOMES, L.A. 2004. **Estudo da dinâmica evolutiva da boçoroca São Dimas no município de São Pedro, SP.** Simpósio brasileiro de desastres naturais, Florianópolis, 2004, p.73-86
- AZEVEDO, A. A., ALBUQUERQUE FILHO, J. L., **Águas subterrâneas.** In: OLIVEIRA, A. M. S. (Org.). **Geologia de Engenharia.** São Paulo – SP: ABGE, 1ª edição, 1998, p. 111-130.
- AZEVEDO, A. A. B., PRESSINOTTI, M. M. N., MASSOLI, M. 1981. **Estudos sedimentológicos das Formações Botucatu e Pirambóia na região de Santa Rita do Passa Quatro, SP.** Revista IG-SP, V2 (1), p.31-38.
- DOURADO, J. C.; MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A. C. O.; NAVA, N. **Deteção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR.** Brazilian Journal of Geophysics, Vol. 19 (1), 14p. 2001.
- FELL, R., FRY, J. J. **Erosion in Geomechanics Applied to Damns and Levees: State of the Art on the Likelihood of Internal Erosion of Damns and Levees by Means of testing.** Editado por Stephane Bonelli, Wiley, London, Series Editor François Nicot. 2013, 399p.

FILIZOLA, H. F.; ALMEIDA FILHO, G. S.; CANIL, K.; SOUZA, M. D.; GOMES, M. A. F. **Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos**. Circular técnica, 22, EMBRAPA, Jaguariúna, SP, Dezembro de 2011.

FRANZINI, I. T. , 2015, 48f. **Identificação de cavidades naturais por meio de eletrorresistividade na região de São Pedro (SP)**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia, UNESP/ IGCE – Rio Claro.

GANDOLFO, O. C. B., 2007, 234f. **Um Estudo do Imageamento Geométrico na Investigação Rasa**. Tese de Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, USP – São Paulo.

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

GEOSOFT: OASIS MONTAJ. Oasis Montaj How-to-Guide: complete workflow for Oasis Montaj. Toronto, Ontario, 2013.

GOOGLE EARTH – Software Google Corporation, 2014.

HUNT, R. E. **Geologic hazards: A Field Guide for Geotechnical Engineers**. CRC Press, EUA, 2006. 334p.

INFANTI JUNIOR, N., FORNASARI FILHO, N. **Processos de dinâmica superficial**. In: OLIVEIRA, A. M. S. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo – SP: ABGE, 1ª edição, 1998, p. 131-152.

JORGE, F. N., UEHARA, K. **Águas de superfície**. In: OLIVEIRA, A. M. S. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo – SP: ABGE, 1ª edição, 1998, p. 101-109.

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. **Geofísica de exploração**. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho, Oficina de Textos, 2002, 429p.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. **Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies**. Berlim: Springer-Verlag, 2007, 1374p.

LAZZARI, M.; LOPERTE, A.; PERRONE, A; **Near surfasse geophysics techniques and geomorphological approach to reconstruct the hazard cave map in historical and urban áreas**. Advances in Gesciences (24), 2010, p.35-44

MACEDO, J. R., CAPECHE, C. L., MELO, A. S., MENEGUELLI, N. A., FRANCO, A. **A. Revegetação da área de contribuição e estabilização de voçorocas através de práticas mecânicas e vegetativas**. EMBRAPA e CNPS, Número 9, dezembro 1998, p. 1-6.

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

MARTINEZ-PAGAN, P.; GOMEZ-ORTIZ,D.; MARTIN-CRESPO, T.; MANTECA, J.I.; ROSIQUE, M. **The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena (SE Spain)**. Engineering Geology, 156, 2013, p. 1-10.

MATHIAS, D. T. **A análise geomorfológica para o desenvolvimento urbano sustentável: o caso das cidades pequenas paulistas, SP-Brasil**. Paper final, PLURIS, 2010, 12p.

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, 129p.

MEDINA, A. S; QUINTAS, M. C. L. **O método de interpolação de curvatura mínima**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife-PE, 2008, 5p.

MILSOM, J. **Field Geophysics: the geological field guide series**. Third edition, Wiley & Sons, London, 2003, 249p.

MILSOM, J.; ERIKSEN, A. **Field Geophysics: the geological field guide series**. Fourth edition, Wiley & Sons, London, 2011, 297p.

MOREIRA, C. V. R, PIRES NETO, A. G. **Clima e relevo**. In: OLIVEIRA, A. M. S. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo – SP: ABGE, 1ª edição, 1998, p. 69-85.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion & Conservation**. Blackwell Publishing, Third Edition, 2005, 316 p.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Looking into the earth: an introduction to geological geophysics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. 493 p.

OKA-FIORI, C. **Geomorfologia e dinâmica temporo-espacial da bacia do Rio Itiquira: Pantanal Matogrossense – MT, MS**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de mesquita Filho, Insituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro – SP, 2002.

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

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoeléctrica en corriente contínua**. Paraninfo, Madrid. 1972.

PANEK, T.; MARGIELEWSKI, W.; TABORIK, P.; URBAN, J.; HRADECKY, J.; SZURA, C. **Gravitationally induced caves and other discontinuities detected by 2D electrical resistivity tomography: case studies from the Polish Flysch Carpathians**. *Geomorphology* 123, 2010, p.165-180.

PARASNIS, D. S. **Principles of Applied Geophysics**. 2^o ed., Butler and Tanner Ltd., Frome and London, 1972, 212p.

ROBINSON, E. S, ÇORUH, C. **Basic Exploration Geophysics**. [S.I.]: John Wiley & Sons Inc., 1988. 562 p.

RODRIGUES, A. **Impõe-se a proibição do rebaixamento forçado do lençol freático em determinados contextos geológicos**. Ecodebate, 2014. Disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/20140701/impoese-a-proibicao-do-rebaixamento-forcado-do-lencol-freatico-em-determinados-contextos-geologicos-urbanos-por-alvaro-rodrigues>>. Acessado em 04 jul. 2015.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. **Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná**. Porto Alegre, Anais XXVIII Congr. Bras. Geol., SBG, 1974. (v.1) p.41 - 65.

SILVA JUNIOR, J. S.; FERREIRA, F. J. F.; STEVANATO, R. **Aplicação dos métodos gravimétrico e resistivimétrico-IP em área de risco geotécnico do sistema aquífero cárstico em Almirante Tamandaré-PR**. Revista Brasileira de Geofísica, 24 (3), 2006 p.411-428.

SIMÕES, M. G. & FITTIPALDI, F. C. **Fósseis da Região de Rio Claro**. Rio Claro, Arquivo Municipal, 1992. 77p.

SOUZA, L. A. P., SILVA, R. F., IYOMASA, W. S., **Métodos de Investigação** In: OLIVEIRA, A. M. S. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo – SP: ABGE, 1^a edição, 1998, p. 163-196.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2^o ed., New York: Cambridge University Press, 2004, 774 p.

ZACHAR, D. **Soil Erosion. Developments in soil science 10**. Elsevier Scientific Publishing Company, Czechoslovaquia, 1982, 549 p.