

Jonas Burigo Martins

**Mapeamento de resistividade do solo para o dimensionamento do
SPDA:
Bacia hidrográfica do Rio Forquilhas**

Florianópolis

2017



Jonas Burigo Martins

**Mapeamento da resistividade do solo para o dimensionamento do
SPDA:
Bacia hidrográfica do Rio Forquilhas**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Engenheiro Civil.
Orientador: Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Martins, Jonas Burigo
Mapeamento da resistividade do solo para o
dimensionamento do SPDA : Bacia hidrográfica do Rio
Forquilhas / Jonas Burigo Martins ; orientador, Rafael
Augusto dos Reis Higashi, 2017.
103 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Bacia hidrográfica do Rio
Forquilhas. 3. Resistividade do solo. 4. Subsistema de
aterramento. 5. Mapeamento geotécnico. I. Higashi, Rafael
Augusto dos Reis. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Jonas Burigo Martins

**Mapeamento da resistividade do solo para o dimensionamento do
SPDA: Bacia hidrográfica do Rio Forquilhas**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 23 de novembro de 2017.



Prof.^a Luciana Rohde, Dr.^a
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Luis Alberto Gomez, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha mãe, pela vida, pela força e pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares pela educação e carinho dado pelos anos, e a sua paciência me suportando. Aos meus pais, Silvana e Jucélio por me ensinarem a ser uma pessoa honesta e caridosa. Aos meus avós, com suas mesas cheias de comida da vovó e sempre com o espaço pra mais um.

A minha namorada, Juliana, que começou comigo esta jornada pela engenharia civil, e me ajudou durante toda a faculdade, em especial neste trabalho final, indo a lugares remotos e no meio do nada fazendo medições. Aos nossos vários fins de semana de preguiça, comendo besteira para relaxar do estresse da faculdade.

Aos meus amigos de trabalho no escritório da Trichês Engenharia, Daniel, Rafael, Tiago e tantos outros que vão e vem, agradeço pelo apoio, pela cobertura, pelo clima familiar e extrovertido de trabalho. Em especial à engenheira Nezita que me atura há tantos anos, que prova que para crescer não é preciso pisar em ninguém, que tem espaço à luz do sol para todos.

A todos os professores da graduação que se esforçam a me ensinar como ser um engenheiro, a transmitir seu conhecimento e testar minhas capacidades.

Ao meu orientador, professor Higashi, que aceitou o desafio de fazer este trabalho que poderia não trazer resultados, agradeço a sua contribuição neste trabalho, paciência ao sanar minhas dúvidas e por de sempre estar disponível.

Aos meus amigos da faculdade, Melissa, Eduardo, Igor e tantos outros, sempre presentes para dividir e resolver as dúvidas no ultimo minuto antes das provas.

Aos meus amigos, Joyce, Luciana, Gabriela, André e Patrícia, pelo apoio e festas no começo da faculdade.

RESUMO

O Subsistema de aterramento deve ser dimensionado de forma a minimizar o risco à vida e ao patrimônio. Este dimensionamento apenas é possível em fase de projeto com a devida informação, sendo uma delas a resistividade do solo, que é difícil de obter sem o equipamento correto e um levantamento específico. Para o auxílio no dimensionamento do subsistema de aterramento foram analisados 19 pontos espacializados dentro da bacia hidrográfica do Rio Forquilhas, visando ao mapeamento da área. Verificou-se a resolução espacial adequada dos pontos espacializados. Foi testada a correlação entre dados obtidos da área de estudo, como: inclinação, altitude e umidade da amostra superficial do solo e a resistividade medida nos pontos espacializados. Foram utilizados métodos de interpolação geoestatística que geraram mapas temáticos que representam a distribuição de resistividade na área de estudo, fez-se a verificação cruzadas nestes mapas, para adoção do melhor método. Estes mapas temáticos resultaram em mapas de resistividades com isolinhas que podem ajudar no dimensionamento do subsistema de aterramento.

Palavras-chave: Mapeamento da Resistividade do solo. Subsistema de aterramento. Geoestatística. Bacia hidrológica do Rio Forquilhas.

ABSTRACT

The ground system must be dimensioned to minimize the risk against life and property. This is only possible in the design phase with adequate information, one of which is the earth resistivity, which is difficult to obtain without the correct equipment and a specific survey. For the aid of dimensioning the ground system, 19 spatialized points were analyzed within the hydrographic basin of the Rio Forquilha, aiming at the mapping of the area. The spatial resolution of the spatialized points was verified. It was tested a correlation between the data obtained from the studied area, such as slope, height above sea level and humidity of the surface soil sample and a measured earth resistivity at the spatialized points. Were used geostatistical interpolation methods that generated thematic maps representing the earth resistivity distribution in the studied area, were cross-validated in these maps to adopt the best method. These thematic maps have resulted in earth resistivity maps with isolines that can aid in the design of the ground system.

Keywords: Earth resistivity. Ground system. Geostatistics. hydrographic basin of the Rio Forquilha.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cubo de 1,0 m ³ de aresta com duas faces de metal	20
Figura 2 - Exemplo do efeito do aumento da umidade e salinidade na resistividade do solo	23
Figura 3 - Exemplo do efeito da variação de temperatura na resistividade do solo ..	24
Figura 4 - Solo real (a) e solo estratificado (b)	25
Figura 5 - Método dos quatro eletrodos genérico	27
Figura 6 - Terrômetro Digital Wenner, ITDR-400, Impac	28
Figura 7 - Método dos quatro eletrodos	28
Figura 8 - Haste cravada verticalmente no solo	30
Figura 9 - Hastes alinhadas em paralelo	31
Figura 10 - Hastes em triângulo equilátero	33
Figura 11 – Curva do fator de interferência para hastes de 1/2” e 1”, a profundidade de 1,2, 1,8, 2,4 e 3,0 metros	33
Figura 12 - Processo de cruzamento de mapas	34
Figura 13 – Exemplo de análise espacial com a utilização de técnicas de interpolação - Superfície do impenetrável à percussão – Zona urbana	36
Figura 14 – Exemplo de análise espacial com a utilização de técnicas de interpolação - Mapa de Resistividades dos Solos de Santa Catarina	37
Figura 15 - Resolução espacial em uma imagem	42
Figura 16 – Localização do município de São José no estado de Santa Catarina ...	44
Figura 17 – Regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina	44
Figura 18 – Método de trabalho	49
Figura 19 – Esquema de conexão das hastes para teste de resistência	52
Figura 20 – Princípio de medição de resistência de terra pelo arranjo de wenner	52
Figura 21 – Medição de resistência no ponto de medição 4	53
Figura 22 – Interface do software GPS Test – coordenadas geográficas	54
Figura 23 - Interface do software GPS Test – precisão da coordenada geográfica ..	54
Figura 24 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,0 metros de profundidade e teor de umidade	61
Figura 25 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,0 metros de profundidade e altitude	62

Figura 26 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,0 metros de profundidade e declividade	62
Figura 27 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,5 metros de profundidade e teor de umidade	63
Figura 28 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,5 metros de profundidade e altitude.....	63
Figura 29 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,5 metros de profundidade e declividade	64
Figura 30 – Gráfico de dispersão de resistividade a 3,0 metros de profundidade e teor de umidade	64
Figura 31 – Gráfico de dispersão de resistividade a 3,0 metros de profundidade e altitude.....	65
Figura 32 – Gráfico de dispersão de resistividade a 3,0 metros de profundidade e declividade	65

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Bacia hidrográfica do Rio Forquilhas e cursos d'água	43
Mapa 2 – Mapa hipsômetro da bacia do Rio Forquilhas.....	45
Mapa 3 – Declividade da bacia do Rio Forquilhas.....	45
Mapa 4 – Mapa geotécnico da bacia do Rio Forquilhas	46
Mapa 5 – Pré-locação dos pontos	51
Mapa 6 – Localização corrigida dos pontos.....	60
Mapa 7 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,0m (interpolação: Inverso ponderado da distância)	68
Mapa 8 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m (interpolação: Inverso ponderado da distância)	68
Mapa 9 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 3,0m (interpolação: Inverso ponderado da distância)	69
Mapa 10 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,0m (interpolação: Krigagem)	69
Mapa 11 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m (interpolação: Krigagem)	70
Mapa 12 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 3,0m (interpolação: Krigagem)	70
Mapa 13 – Mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,0m.....	75
Mapa 14 – Mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m.....	76
Mapa 15 – Mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 3,0m.....	76
Mapa 16 – Locação da edificação no mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Simbologia simplificada das classes pedológicas.....	35
Quadro 2 - Simbologia simplificada da geologia.....	35
Quadro 3 - Triangulação linear – Vantagens e desvantagens	38
Quadro 4 - Inverso ponderado da distância – Vantagens e desvantagens.....	39
Quadro 5 - Krigagem – Vantagens e desvantagens	40
Quadro 6 - Classificação e descrição das ordens.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Material, configuração e dimensões mínimas de eletrodo de aterramento	19
Tabela 2 - Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solo	21
Tabela 3 - Exemplo do aumento de umidade na resistividade do solo	22
Tabela 4 - Exemplo do aumento de umidade na resistividade do solo	22
Tabela 5 - Exemplo do efeito do aumento da salinidade na resistividade do solo (umidade 15% e temperatura 17°C)	23
Tabela 6 – Exemplo do efeito da variação de temperatura na resistividade do solo (umidade 15,2%)	24
Tabela 7 – Exemplo do efeito da variação de temperatura na resistividade do solo arenoso.....	24
Tabela 8 – Tabela de fator de interferência “k” de hastes de 2,0m igualmente espaçadas	31
Tabela 9 – Tabela de fator de interferência “k” de hastes de 2,4m igualmente espaçadas	32
Tabela 10 – Tabela de fator de interferência “k” de hastes de 3,0m igualmente espaçadas	32
Tabela 11 - Unidades geotécnicas e suas respectivas áreas	47
Tabela 12 - Número mínimo de observações	50
Tabela 13 – Resultado do levantamento das coordenadas geográficas.....	57
Tabela 14 – Resultado do levantamento de campo das resistividades do solo	58
Tabela 15 – Dados de resistividade, teor de umidade e localização dos pontos	58
Tabela 16 – Comparação de dados relevantes à resistividade dos pontos	59
Tabela 17 – Número de observações por área classificada	61
Tabela 18 – R ² correlacionando individualmente as variáveis e a resistividade	66
Tabela 19 – R ² de variáveis combinadas para Cambissolo	66
Tabela 20 - R ² de variáveis combinadas para Glei	67
Tabela 21 – Validação cruzada - Inverso ponderado da distância – resistividade a 2,0m.....	71

Tabela 22 – Validação cruzada - Inverso ponderado da distância – resistividade a 2,5m	72
Tabela 23 – Validação cruzada - Inverso ponderado da distância – resistividade a 3,0m	72
Tabela 24 – Validação cruzada - Krigagem – resistividade a 2,0m.....	73
Tabela 25 – Validação cruzada - Krigagem – resistividade a 2,5m.....	73
Tabela 26 – Validação cruzada - Krigagem – resistividade a 3,0m.....	74
Tabela 27 – Comparação da validação cruzada	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CBM/SC – Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina

ELAT - Grupo de eletricidade atmosférica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IN – Instrução Normativa

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SPDA – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	17
2.1.1 Sistema de proteção para descargas atmosféricas.....	17
2.1.1.1 Subsistema de aterramento	18
2.1.1.1.1 Geometria do subsistema de aterramento	18
2.1.1.1.2 Materiais	19
2.1.1.1.3 Características do solo	20
2.2 RESISTIVIDADE DO SOLO	20
2.2.1 Composição do solo.....	20
2.2.1.1 Tipo de solo	21
2.2.1.2 Umidade e salinidade	21
2.2.1.3 Temperatura	23
2.2.2 Medição de resistividade do solo.....	24
2.2.2.1 Amostragem física do solo.....	25
2.2.2.2 Método da variação de profundidade.....	26
2.2.2.3 Método dos dois eletrodos.....	26
2.2.2.4 Método dos quatro eletrodos	27
2.3 CÁLCULO DE ATERRAMENTO COM O USO DE RESISTIVIDADE DO SOLO	29
2.3.1 Dimensionamento de um sistema com uma haste vertical	30
2.3.2 Dimensionamento de um sistema formado por hastes alinhadas em paralelo e igualmente espaçadas.....	30
2.3.3 Dimensionamento de um sistema com hastes em triângulo	32

2.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	33
2.4.1 Classificação geotécnica.....	34
2.4.2 Análise espacial de superfícies.....	35
2.4.2.1 Triangulação linear	37
2.4.2.2 Inverso ponderado da distância.....	38
2.4.2.3 Krigagem	39
2.4.3 Resolução espacial	41
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
3.1 Mapa geotécnico	46
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 COLETA DE DADOS PREEXISTENTES.....	49
4.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO	49
4.2.1 Definição de pontos de medição.....	50
4.2.2 Método de medição	51
4.2.2.1 Medição de resistividade do solo.....	51
4.2.2.2 Medição do teor de umidade natural	53
4.2.2.3 Coordenadas dos pontos medidos	54
4.2.3 Georreferenciamento dos pontos	55
4.3 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES	55
4.4 GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS	55
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1 RESULTADO DAS MEDIÇÕES	57
5.2 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES	60
5.3 GERAÇÃO DE MAPAS	67
5.4 SUGESTÃO DE USO DO MAPA DE ISOLINHAS	77
5.4.1 Exemplo de cálculo	77
6 CONCLUSÕES	81
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82

REFERÊNCIAS 83
ANEXO A – Certificado de calibração 87

1 INTRODUÇÃO

A incidência de raios no Brasil é bastante significativa, sendo um problema a ser considerado na construção civil, de forma que, o projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) é parte fundamental em edificações de grande e médio porte. Segundo levantamento do Grupo de eletricidade atmosférica (ELAT), que faz parte do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), nos últimos seis anos, o número médio anual de raios no Brasil foi de 77,8 milhões. Também segundo o ELAT a média anual de mortes devido a descargas atmosféricas é de 111 mortes. Apesar do número de mortes virem diminuindo nos últimos anos (chegando a ter uma previsão abaixo de 70 mortes em 2016), ainda é um valor bastante alto se comparar com países desenvolvidos. No Brasil têm-se o registro de 0,7 mortes por milhão de habitantes, onde em países como o EUA temos registro de 0,1 mortes por milhão de habitante.

“Não há dispositivos ou métodos capazes de modificar os fenômenos climáticos naturais a ponto de se prevenir a ocorrência de descargas atmosféricas. As descargas atmosféricas que atingem estruturas (ou linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram nas estruturas) ou que atingem a terra em suas proximidades são perigosas às pessoas, às próprias estruturas, seus conteúdos e instalações. Portanto, medidas de proteção contra descargas atmosféricas devem ser consideradas” (NBR 5419-1:2015).

Para o projeto de proteção contra descargas atmosféricas ser eficiente deve atingir uma resistência máxima no aterramento, sendo ela definida pela NBR 5419, e/ou pelo corpo de bombeiros do estado (Para Santa Catarina, fica definido pela IN 010 do CBM/SC). Este valor máximo pode ser calculado pelo número de hastes de aterramento, a geometria do sistema e a resistividade do solo. Porém, a resistividade do solo normalmente é desconhecida, e dificilmente se faz a medição para determinar este parâmetro, assim fazendo-se o projeto utilizando apenas o mínimo de hastes que a norma exige.

1.1 OBJETIVOS

Como a resistividade depende das características do solo (como: tipo, origem, umidade e temperatura), propõe-se coletar pontos de resistividade na região

de São José, dentro de uma mesma bacia hidrográfica, para gerar um mapa de resistividade que pode auxiliar no melhor desenvolvimento do projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

1.1.1 Objetivo Geral

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo geral a análise de pontos conhecidos e pré-determinados, para possibilitar a criação de um mapa de resistividade do solo da região de estudo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Constituirão os objetivos específicos deste trabalho:

- Correlacionar as características físicas do solo com os valores de resistividade de solo, medidos em pontos espacializados.
- Elaborar mapas temáticos de resistividade de solo da região de estudo;
- Desenvolver o mapa de isolinhas de resistividade do solo da bacia hidrográfica do Rio Forquilhas;
- Aplicar o mapa desenvolvido para o dimensionamento do aterramento de uma edificação fictícia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo contém as referências bibliográficas e fundamentações necessárias para a elaboração e contextualização deste trabalho.

2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Definida como: “descarga elétrica de origem atmosférica” (NBR 5419-1:2015, pg. 2). Ela pode ser tanto ascendente (iniciada da terra ou estrutura aterrada para uma nuvem) ou descendente (iniciada de uma nuvem para terra ou estrutura aterrada).

O Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), é o principal responsável pelas pesquisas e estudos sobre eletricidade atmosférica no Brasil. Este órgão trata as descargas atmosféricas como relâmpagos, definindo como: “uma corrente elétrica muito intensa que ocorre na atmosfera com típica duração de meio segundo e típica trajetória com comprimento de 5 a 10 km” (INPE/ELAT, 2017). O Grupo ainda trata de raios, sendo estes o ato de conexão entre a terra e o relâmpago, podendo ser ascendente (quando a corrente se dá a partir do solo) ou descendente (quando a corrente vai de encontro ao solo).

2.1.1 Sistema de proteção para descargas atmosféricas

O Sistema de proteção contra descargas atmosféricas tem como objetivo desviar a corrente elétrica das descargas atmosféricas para a terra, causando o mínimo possível de prejuízo à vida humana e ao patrimônio, visto que não há como impedir que as descargas aconteçam (NBR 5419:2015).

Segundo a NBR 5419:2015 (Proteção contra descargas atmosféricas) o SPDA é composto de um sistema interno¹ e um sistema externo de proteção, o sistema externo é o responsável pela condução da descarga atmosférica para a terra, e consiste de 3 (três) elementos básicos:

- Subsistema de captação;
- Subsistema de descida;

¹ Parte do SPDA consistindo em ligações equipotenciais e/ou isolamento elétrica do SPDA externo (NBR 5419:2015).

- Subsistema de aterramento.

Apenas o Subsistema de aterramento faz parte do escopo deste trabalho, assim não se entrará em detalhes sobre o restante do sistema. Apenas é necessário saber que os Subsistemas de captação e descida são dimensionados e posicionados de modo a desviar a corrente das descargas atmosféricas para o Subsistema de aterramento.

2.1.1.1 Subsistema de aterramento

“Parte de um SPDA externo que é destinada a conduzir e dispersar a corrente da descarga atmosférica na terra” (NBR 5419-3:2015, pg 2).

Quanto menor a resistência do subsistema de aterramento, melhor é a proteção oferecida pelo SPDA. A atual NBR 5419:2015 não estabelece um valor máximo para a resistência do subsistema, apenas estabelecendo que o mesmo deve “obter a menor resistência de aterramento possível, compatível com o arranjo do eletrodo, a topologia e a resistividade do solo no local” (NBR 5419-3:2015, pg. 17). A NBR anterior (NBR 5419:2001) e a atual norma do CBM/SC, IN 010 estabelecem o valor máximo de 10Ω para a resistividade do subsistema. Este trabalho irá considerar o valor máximo de 10Ω como base de referência para o seguro dimensionamento do sistema.

Esta resistência é influenciada pela geometria do subsistema de aterramento, o material utilizado e as características do solo em que se encontra aterrado.

2.1.1.1.1 Geometria do subsistema de aterramento

Segundo KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1995), a geometria do subsistema de aterramento é determinada pela sua dimensão e forma, assim criando diversos tipos de distribuição, os mais comuns são:

- Uma haste simples cravada no solo;
- Hastes alinhadas;
- Hastes em triângulo;
- Hastes em quadrado;
- Hastes em círculo;
- Placa de material condutor enterrada no solo;
- Fios ou cabos enterrados formando uma malha de aterramento.

A geometria do subsistema de aterramento a ser adotado depende da importância do SDPA no local e o quão eficiente o aterramento no local precisa ser. O sistema mais eficiente é a malha de aterramento (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

No capítulo 2.3 tratar-se-á do dimensionamento de algumas geometrias adotadas para o subsistema de aterramento.

2.1.1.1.2 Materiais

A influência do material tem relação com a sua resistência, quanto maior a sua resistência, maior seu impacto negativo no subsistema de aterramento.

A resistência de qualquer matéria é caracterizada por sua dimensão e resistividade, assim são estabelecidos, pela NBR 5419, alguns materiais e suas dimensões mínimas, conforme apresentado na Tabela 1, para o subsistema de aterramento.

Tabela 1 – Material, configuração e dimensões mínimas de eletrodo de aterramento

Material	Configuração	Dimensões mínimas ^f		Comentários ^f
		Eletrodo cravado (Diâmetro)	Eletrodo não cravado	
Cobre	Encordoado ^c	-	50 mm ²	Diâmetro de cada fio cordoalha 3 mm
	Arredondado maciço ^c	-	50 mm ²	Diâmetro 8 mm
	Fita maciça ^c	-	50 mm ²	Espessura 2 mm
	Arredondado maciço	15 mm	-	Espessura da parede 2 mm
	Tubo	20 mm	-	-
Aço Galvanizado à quente	Arredondado maciço ^{a,b}	16 mm	Diâmetro 10 mm	Espessura da parede 2 mm
	Tubo ^{a,b}	25 mm	-	Espessura 3 mm
	Fita maciça ^a	-	90 mm ²	-
	Encordoado	-	70 mm ²	Espessura da parede 2 mm
Aço cobreado	Arredondado maciço ^d Encordoado ^e	12,7 mm	70 mm ²	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,45 mm
Aço Inoxidável ^e	Arredondado maciço Fita maciça	15 mm	Diâmetro 10 mm 100 mm ²	Espessura mínima 2 mm

^a O revestimento a quente (fogo) deve ser conforme a ABNT 6323 [1].

^b Aplicável somente a mini captos. Para aplicações onde esforços mecânicos, por exemplo: força do vento, não forem críticos, é permitida a utilização de elementos com diâmetro mínimo de 10 mm e comprimento máximo de 1 m.

^c Composição mínima AISI 304 ou composto por: cromo 16%, níquel 8%, carbono 0,07%.

^d Espessura, comprimento e diâmetro indicados na tabela refere-se aos valores mínimos sendo admitida uma tolerância de 5%, exceto para o diâmetro dos fios das cordoalhas cuja tolerância é de 2%.

^e Sempre que os condutores desta tabela estiverem em contato direto com o solo devem atender as prescrições desta tabela.

^f A cordoalha deve ter uma condutividade mínima de 30% IACS (International Annealed Copper Standard).

^g Esta tabela não se aplica aos materiais utilizados como elementos naturais de um SPDA.

2.1.1.1.3 Características do solo

Assim como para qualquer outro material, o que determina a resistência do solo é sua resistividade e sua dimensão.

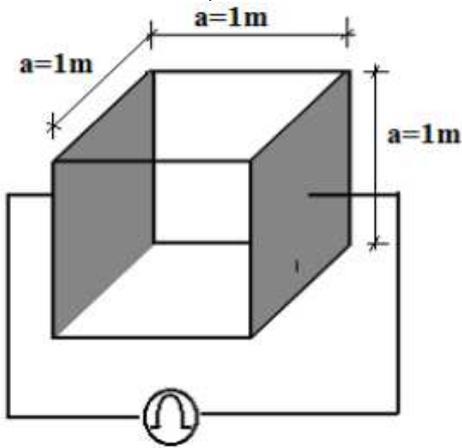
A dimensão do solo utilizado é dependente da geometria do subsistema de aterramento (tamanho e posição). A resistividade do solo, que é objeto deste trabalho, será discutida no capítulo 2.2.

2.2 RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade é uma propriedade física de cada substância, sendo medida e tabelada para diversos materiais. O sistema de aterramento tem uma relação direta com os parâmetros que influenciam a resistividade do solo.

A resistividade específica de um solo pode definir-se como sendo a resistência elétrica R [Ω], medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta $L = 1,0$ m, área das faces $A = 1,0$ m²), preenchido com a terra do respectivo solo (COELHO, 2011, pg. 18), como representado na Figura 1.

Figura 1 – Cubo de 1,0 m³ de aresta com duas faces de metal



Fonte: COELHO, 2011

2.2.1 Composição do solo

Conforme NBR 7117:2012 (Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo), o solo é um meio normalmente heterogêneo, de modo que o valor de sua resistividade varia em função de algumas características, as principais características são:

- Tipo;
- Idade e formação geológica;

- Profundidade das camadas;
- Umidade;
- Salinidade; e
- Temperatura.

Alguns fatores externos, como contaminação e compactação também influenciam na resistividade do solo.

2.2.1.1 Tipo de solo

A resistividade do solo varia amplamente de um tipo de solo para outro. A Tabela 2 mostra a variação da resistividade para diferentes tipos de solos.

Esta variação da resistividade de um local para outro é devido à formação geológica dos solos. A variação em um mesmo local é devido à profundidade das camadas estratificadas do solo, pois conforme aumenta a profundidade do solo a resistividade tende ao infinito, ou seja, o solo adquire características de um material isolante.

Os solos com matéria orgânica ou calcária têm normalmente resistividade baixa, solos arenosos tendem a ter resistividade mais alta.

Tabela 2 - Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solo

Tipos de solo	Faixas de resistividade ($\Omega.m$)
Água do mar	menor do que 10
Alagadiço, limo, humus, lama	até 150
Água destilada	300
Argila	300 - 5.000
Calcário	500 - 5.000
Areia	1.000 - 8.000
Granito	1.500 - 10.000
Basalto	a partir de 10.000
Concreto ^a	Molhado: 20 - 100 Úmido: 300 - 1.000 Seco: 3 K $\Omega.m$ - 2 M $\Omega.m$

^a A categoria molhado é típica de aplicação em ambientes externos.
Valores inferiores a 50 $\Omega.m$ são considerados altamente corrosivos

Fonte: NBR 7117:2012

2.2.1.2 Umidade e salinidade

A condução elétrica no solo é eletrolítica, aumentando conforme a elevação da salinidade e umidade.

O comportamento do sistema de aterramento quando submetido a uma elevada corrente elétrica é essencialmente eletrolítico, ou seja, por aquecimento nas regiões próximas do eletrodo de aterramento ocorre uma ionização do solo. Assim, a resistividade é afetada pela quantidade de água e sais existente no solo (Emilio, 2009, pg. 13).

A umidade do solo ajuda na dissolução dos sais presentes naturalmente no solo, tornando o meio um melhor condutor, diminuindo a resistividade. Os sais presentes no solo são o que torna o meio um eletrólito apropriado para a passagem da corrente. Assim com o aumento de umidade e/ou salinidade tem-se a diminuição na resistividade do solo.

Nas Tabelas 3 e 4 e na Figura 2 encontra-se representado o efeito da diminuição da resistividade em decorrência do aumento da porcentagem da umidade no solo.

Tabela 3 - Exemplo do aumento de umidade na resistividade do solo

Umidade por massa de umidade	Resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)	
	Solo de superfície	Solo arenoso
0,0	1.000×10^6	1.000×10^6
2,5	250.000	150.000
5,0	165.000	43.000
10,0	53.000	22.000
15,0	21.000	13.000
20,0	12.000	10.000
30,0	10.000	8.000

Fonte: "An Investigation of Earthing Resistance", P.J. Higgs (1930).

Tabela 4 - Exemplo do aumento de umidade na resistividade do solo

Índice de Umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega \cdot \text{m}$) (Solo arenoso)
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1995)

Na Tabela 5 e Figura 2 encontra-se representado o efeito da diminuição da resistividade em decorrência do aumento da porcentagem de salinidade no solo.

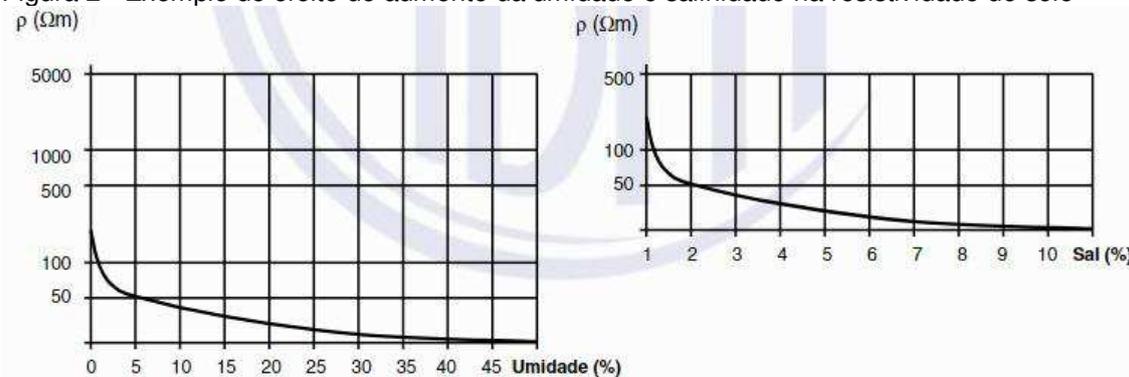
Tabela 5 - Exemplo do efeito do aumento da salinidade na resistividade do solo (umidade 15% e temperatura 17°C)

Percentual de Sal adicionado por massa de umidade	Resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)
0,0	10.700
0,1	1.800
1,0	460
5,0	190
10,0	130
20,0	100

Fonte: "An Investigation of Earthing Resistance", P.J. Higgs (1930).

A NBR 7117 representa o efeito através de gráfico, mostrado na Figura 2 em dois diferentes tipos de solos não especificados.

Figura 2 - Exemplo do efeito do aumento da umidade e salinidade na resistividade do solo



Fonte: NBR 7117:2012

2.2.1.3 Temperatura

Em relação à influência da temperatura, destacam-se dois aspectos importantes: a diminuição da umidade do solo, resultando o aumento da resistividade devido à evaporação ocasionada por elevadas temperaturas e a influência do comportamento da resistividade da água em função da temperatura, na qual a resistividade cresce conforme a temperatura diminui. As Tabelas 6 e 7 e a Figura 3 mostram essa variação, mantendo-se o teor de umidade.

Pode-se levar em conta, também, que o aumento na temperatura aumenta a efetividade das reações químicas melhorando a condução ou a dissolução dos sais. Assim, quanto maior a temperatura, menor a resistividade. Quando a temperatura passa do ponto de congelamento há um salto na resistividade.

Tabela 6 – Exemplo do efeito da variação de temperatura na resistividade do solo (umidade 15,2%)

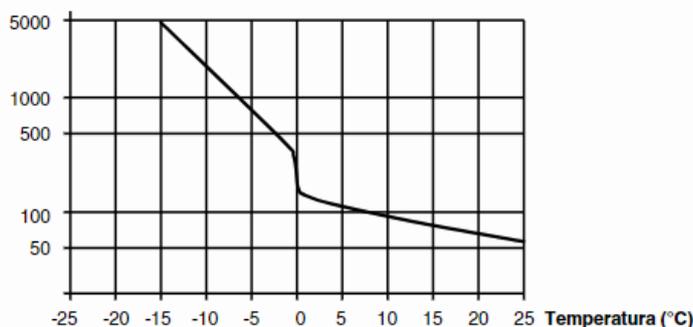
Temperatura (°C)	Resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)
20	7.200
10	9.900
0 (água)	13.800
0 (gelo)	30.000
-5	79.000
-15	330.000

Fonte: “An Investigation of Earthing Resistance”, P.J. Higgs (1930).

Tabela 7 – Exemplo do efeito da variação de temperatura na resistividade do solo arenoso

Temperatura (°C)	Resistividade ($\Omega \cdot \text{m}$) (Solo arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3.300

Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1995)

Figura 3 - Exemplo do efeito da variação de temperatura na resistividade do solo ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)

Fonte: NBR 7117:2012

2.2.2 Medição de resistividade do solo

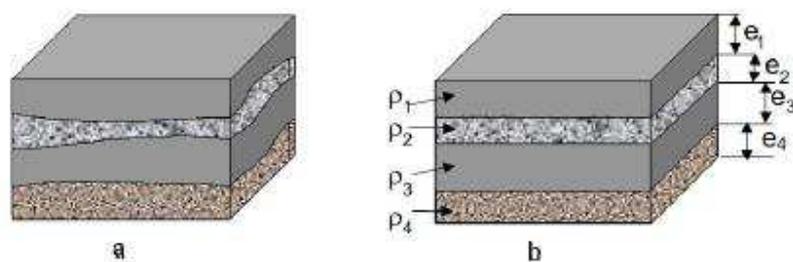
No Brasil existe uma norma específicas para a medição de resistividade do solo (NBR 7117:2012).

A determinação de resistividade do solo é diretamente dependente da estratificação dos solos e sua importância é fundamental para a caracterização do aterramento.

Em geral, o solo é constituído por diversas camadas, cada uma apresentando certo valor de resistividade e uma espessura própria.

O valor de resistividade do solo é determinado através de medições, de modo a se obter a estratificação do solo em camadas paralelas ou horizontais, de diferentes resistividades (r) e de espessuras (e) definidas, conforme Figura 4.

Figura 4 - Solo real (a) e solo estratificado (b)



Legenda

ρ_1, e_1 Resistividade e espessura da camada de número 1

ρ_2, e_2 Resistividade e espessura da camada de número 2

ρ_3, e_3 Resistividade e espessura da camada de número 3

ρ_4, e_4 Resistividade e espessura da camada de número 4

Fonte: NBR 7117:2012

Considerando-se, então, a heterogeneidade do solo, verificada pela variação na medição da resistividade do solo à medida que suas camadas são analisadas.

Analisando-se as camadas como um todo, têm-se uma resistividade equivalente do solo. Para os sistemas de aterramento, as hastes são colocadas normalmente na mesma profundidade e utilizam a resistividade equivalente deste solo estratificado, assim será considerada apenas a medição de resistividade, e o solo superficial homogêneo.

As medições de resistividade são feitas injetando-se uma corrente, circulando por dois eletrodos e detectando a diferença de potencial por outros dois eletrodos.

Como existem fatores meteorológicos que influenciam a resistividade do solo, a NBR 7117:2012 estabelece que a medição deva ser feita após 7 (sete) dias sem chuvas e em temperaturas coerentes.

A NBR 7117:2012 estabelece 4 métodos para a medição da resistividade do solo

2.2.2.1 Amostragem física do solo

Em laboratório pode-se obter o comportamento do solo, incluindo curvas de resistividade em função da umidade.

Baseia-se na medição da resistência, entre duas faces condutoras de um cubo de dimensões conhecidas e preenchido com uma amostra do solo recolhido a uma profundidade suficiente para se considerar imune a variações das condições ambientais, devendo a amostra estar firmemente compactada dentro do cubo (COELHO, 2011, pg. 25).

Porém, para a medição de resistividade do solo natural, este método não é o mais indicado, pois as amostras enviadas ao laboratório podem não possuir as mesmas características que apresentavam no terreno natural, como heterogêneas e compactidade (VISACRO FILHO, 2005) e (SOZO, 2014).

2.2.2.2 Método da variação de profundidade

Também conhecido como "método de três eletrodos", o ensaio é feito variando a profundidade do eletrodo (haste) de ensaio. Este ensaio é feito medindo-se a resistência de uma única haste enterrada, a medição desta resistência deve ser feita seguindo a NBR 15749:2009, conforme orientação da própria NBR 7117:2012.

Com o valor da resistência, e conhecendo as profundidades e o raio da haste, pode-se calcular a resistividade do solo, pela Equação (1) presente na NBR 7117:2012.

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \left\{ \ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right\} \quad (1)$$

Onde,

R é a resistência medida, em ohms Ω (ohms);
 ρ é a resistividade a calcular, em $\Omega \cdot m$ (ohms.metro);
L é o comprimento da haste, em metros;
r é o raio da haste, em metros.

2.2.2.3 Método dos dois eletrodos

Trata-se de um método aproximado, para avaliar a ordem de grandeza da resistividade de pequenos volumes de solo. Consiste em cravar dois eletrodos iguais, a uma mesma profundidade, afastados a uma distância adequada (maior ou igual a 5L). Interligam-se os eletrodos através de um cabo isolado e mede-se a resistência em série dos eletrodos com um instrumento do tipo alicate terrômetro, com a pinça enlaçando o cabo de interligação.

Como a resistência medida para os dois eletrodos R_m é duas vezes a de cada eletrodo, R_{1e} , como na Equação (2), a resistividade média do solo entre os eletrodos será conforme Equação.

$$R_m = 2 \cdot R_{1e} = 2 \cdot \frac{\rho_{2e}}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{r}\right) = \frac{\rho_{2e}}{\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{r}\right) \quad (2)$$

$$\rho_{2e} = \frac{R_m \pi L}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)} \quad (3)$$

Onde,

ρ_{2e} é a resistividade média vista pelos dois eletrodos, em $\Omega \cdot m$ (ohms.metro);

R_m é a resistividade medida, Ω (ohms);

L é a profundidade de cravação, em metros;

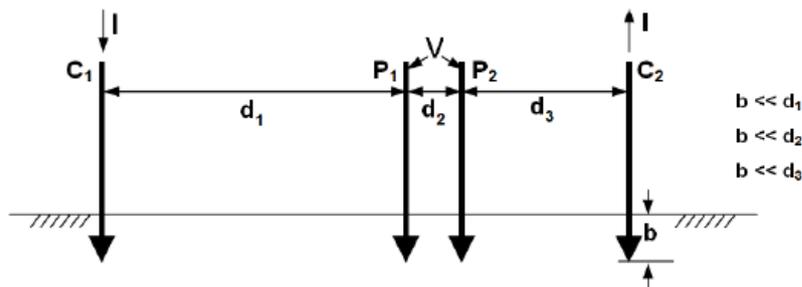
r é o raio do eletrodo, em metros.

2.2.2.4 Método dos quatro eletrodos

Pequenos eletrodos são cravados no solo a pequenas profundidades, alinhados e espaçados em intervalos não necessariamente iguais. A corrente de ensaio é injetada entre os dois eletrodos externos e a diferença de potencial é medida entre os dois eletrodos internos com um potenciômetro ou um voltímetro de alta impedância, conforme Figura 5. A resistividade é dada pela Equação (4).

$$\rho_1 = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3} - \frac{1}{(d_1 + d_2)} - \frac{1}{(d_2 + d_3)}} \times \left(\frac{V}{I}\right) \quad (4)$$

Figura 5 - Método dos quatro eletrodos genérico



Legenda

- I corrente entre os eletrodos de corrente C_1 e C_2
- V diferença de tensão entre os eletrodos de potencial P_1 e P_2
- d_1 distância entre os eletrodos C_1 e P_1
- d_2 distância entre os eletrodos P_1 e P_2
- d_3 distância entre os eletrodos C_2 e P_2
- b profundidade de cravação dos eletrodos

Fonte: NBR 7117:2012

O arranjo mais utilizado é o "arranjo de Wenner" onde é necessário utilizar "Testadores de Aterramento". Este método é o mais adequado e utilizado para o levantamento da resistividade em campo. Neste trabalho, utilizou-se o aparelho da Impac, modelo ITRD-400, Figura 6.

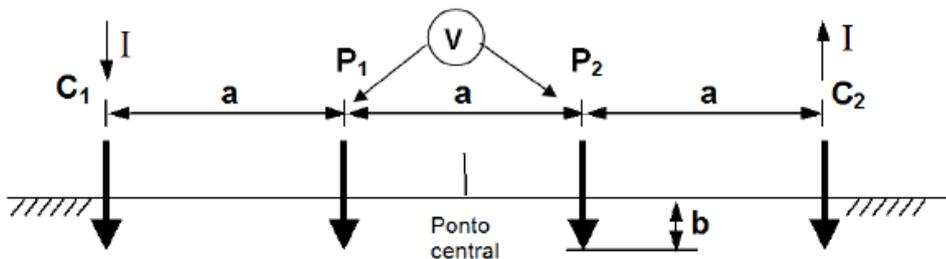
Figura 6 - Terrômetro Digital Wenner, ITDR-400, Impac



Fonte: <https://www.impac.com.br/terrometro-aterramento/terrometro-digital-impac-metodo-wenner-nbr7117-itrd400.html> (setembro, 2017)

Conforme NBR 7117:2012 a medição é feita colocando-se as 4 hastes igualmente espaçadas, como mostrado na Figura 7. "C1" e "C2" são os eletrodos de corrente. A tensão é medida entre os eletrodos "P1" e "P2" do arranjo. Sendo "a" a distância entre eletrodos adjacentes e "b" a profundidade de cravação destes, a resistividade em função de "a" e "b" é dada pela Equação (5).

Figura 7 - Método dos quatro eletrodos



Fonte: NBR 7117:2012

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times a \times \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (5)$$

Na prática, utiliza-se quatro eletrodos distribuídos em uma linha reta em intervalos “a”, enterrados a uma profundidade que não exceda 10 % de “a”. Quando “b” ≤ “a”/10, a equação se torna a Equação (6).

$$\rho_{(a)} = 2\pi \times a \left(\frac{V}{I}\right) \quad (6)$$

Essa equação é aproximadamente a resistividade média do solo na profundidade “a”.

Um conjunto de leituras tomadas com vários espaçamentos entre eletrodos resulta em um conjunto de resistividades que, quando plotadas em função do espaçamento, indicam a variação da resistividade com a profundidade.

Os eletrodos do instrumento devem estar sempre firmes e com boa aderência ao solo.

Por exemplo, se o espaçamento for de 4 m e os eletrodos forem cravados a 20 cm, a equação simplificada pode ser utilizada, mas, se o espaçamento for de 1 m, ter-se-ia que cravar o eletrodo com menos de 10 cm, o que geralmente não é suficiente para ter um contato adequado com o solo. (NBR 7117:2012, pg. 12).

Este método é bastante utilizado para a estratificação do solo, mas conforme já afirmado, será considerado a medição do aparelho como um solo homogêneo.

2.3 CÁLCULO DE ATERRAMENTO COM O USO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

Normalmente, para o cálculo da resistência do aterramento, é necessário uma curva, obtida em um gráfico de resistividade x profundidade do solo estratificado. Porém, como definido anteriormente, será utilizada a medição direta em uma profundidade específica, considerando-se esta a resistividade aparente.

Como já mencionado neste trabalho, a passagem de corrente elétrica para o solo depende da composição do solo, geometria do aterramento e o tamanho do

sistema de aterramento, o qual é relacionado a profundidade de penetração das correntes ao solo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

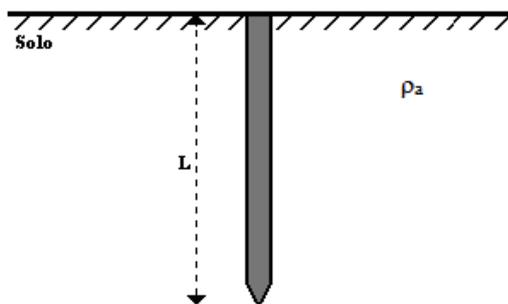
O escoamento da corrente elétrica emanada ou absorvida pelo sistema de aterramento se dá através de uma resistividade aparente que é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerando a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995) e (PINHEIRO, 2013).

Portanto, serão analisados, inicialmente, os sistemas de aterramento em relação a uma resistividade aparente.

2.3.1 Dimensionamento de um sistema com uma haste vertical

O aterramento com haste única vertical, Figura 8, pode ter sua resistência calculada pela Equação (1).

Figura 8 - Haste cravada verticalmente no solo



Fonte: PINHEIRO, 2013.

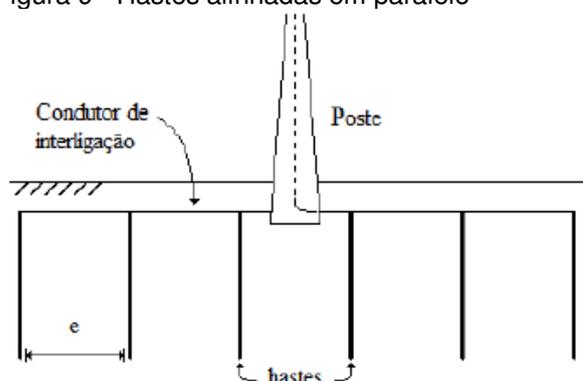
2.3.2 Dimensionamento de um sistema formado por hastes alinhadas em paralelo e igualmente espaçadas

Neste sistema são adotadas hastes de mesmo comprimento, espaçadas igualmente em linha (Figura 9), interligadas por cabo de dimensão conforme a Tabela 1 de acordo com a NBR 5419-3:2015.

Para calcular a resistência equivalente desse arranjo é preciso levar em consideração a interferência de cada haste (PINHEIRO, 2013, pg. 40). Esta interferência pode ser simplificada através de um fator “k”, que depende do número de hastes “n”, seu comprimento “L” e diâmetro “d”. A NBR 5419-3:2015 limita o diâmetro mínimo das hastes de cobre a 15mm (3/8”), e o comprimento mais comum utilizado no mercado em Florianópolis, e exigido atualmente pela IN 010 do CBM/SC, é de 2,40m, enquanto as demais normas não especificam limites para a

profundidade do eletrodo. Assim são apresentadas as Tabelas 8 a 10 calculadas por KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1995), trazendo as hastes em profundidade de 2,0, 2,4 e 3,0 metros, que serão as profundidades estudadas por este trabalho.

Figura 9 - Hastes alinhadas em paralelo



Fonte: PINHEIRO, 2013.

Tabela 8 – Tabela de fator de interferência “k” de hastes de 2,0m igualmente espaçadas

Espaçamentos Número de Hastes	L = 2,0m							
	2m		3m		4m		5m	
	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"
2	0,571	0,577	0,550	0,554	0,539	0,542	0,531	0,534
3	0,413	0,420	0,389	0,394	0,376	0,380	0,368	0,371
4	0,329	0,335	0,305	0,309	0,292	0,296	0,284	0,287
5	0,275	0,281	0,252	0,257	0,240	0,243	0,232	0,235
6	0,238	0,243	0,216	0,220	0,204	0,207	0,197	0,200
7	0,210	0,215	0,189	0,193	0,178	0,181	0,172	0,174
8	0,189	0,194	0,169	0,173	0,159	0,161	0,152	0,154
9	0,171	0,176	0,153	0,156	0,143	0,145	0,137	0,139
10	0,157	0,162	0,140	0,143	0,130	0,133	0,124	0,126
11	0,146	0,150	0,129	0,132	0,120	0,122	0,114	0,116
12	0,136	0,140	0,119	0,122	0,111	0,113	0,105	0,107
13	0,127	0,131	0,111	0,114	0,103	0,105	0,098	0,100
14	0,120	0,124	0,105	0,107	0,097	0,099	0,092	0,093
15	0,113	0,117	0,099	0,101	0,091	0,093	0,086	0,088

Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995.

Tabela 9 – Tabela de fator de interferência “k” de hastes de 2,4m igualmente espaçadas

L = 2,4m								
Espaçamentos	2,5m		3m		4m		5m	
	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"
2	0,566	0,572	0,557	0,562	0,544	0,548	0,536	0,539
3	0,408	0,414	0,397	0,403	0,383	0,387	0,374	0,377
4	0,324	0,330	0,313	0,318	0,298	0,302	0,289	0,292
5	0,270	0,276	0,260	0,265	0,246	0,250	0,237	0,240
6	0,233	0,238	0,223	0,228	0,210	0,214	0,202	0,205
7	0,206	0,211	0,196	0,201	0,184	0,187	0,176	0,179
8	0,185	0,189	0,176	0,180	0,164	0,167	0,156	0,159
9	0,168	0,172	0,159	0,163	0,148	0,151	0,141	0,143
10	0,154	0,158	0,146	0,149	0,135	0,138	0,128	0,130
11	0,142	0,146	0,134	0,138	0,124	0,127	0,118	0,120
12	0,132	0,136	0,125	0,128	0,115	0,118	0,109	0,111
13	0,124	0,128	0,117	0,120	0,107	0,110	0,101	0,103
14	0,117	0,120	0,110	0,113	0,101	0,103	0,095	0,097
15	0,110	0,113	0,103	0,106	0,095	0,097	0,089	0,091

Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995.

Tabela 10 – Tabela de fator de interferência “k” de hastes de 3,0m igualmente espaçadas

L = 3,0m						
Espaçamentos	3m		4m		5m	
	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"	d=5/8"	d=1"
2	0,556	0,571	0,552	0,556	0,543	0,546
3	0,408	0,414	0,392	0,396	0,381	0,385
4	0,324	0,329	0,307	0,312	0,297	0,300
5	0,270	0,276	0,255	0,259	0,245	0,248
6	0,233	0,238	0,218	0,222	0,209	0,212
7	0,206	0,211	0,192	0,195	0,182	0,185
8	0,185	0,189	0,171	0,175	0,162	0,165
9	0,168	0,172	0,155	0,158	0,147	0,149
10	0,154	0,158	0,142	0,146	0,134	0,136
11	0,142	0,146	0,130	0,133	0,123	0,125
12	0,132	0,136	0,121	0,124	0,114	0,116
13	0,124	0,128	0,113	0,116	0,106	0,109
14	0,117	0,120	0,106	0,109	0,100	0,102
15	0,110	0,113	0,100	0,103	0,094	0,096

Fonte: Adaptado de KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995.

Com o fator de interferência pode-se calcular a resistência do sistema pela Equação (7).

$$R = k \times R_1 \quad (7)$$

Onde,

R é a resistência do sistema;

K é o fator de interferência; e,

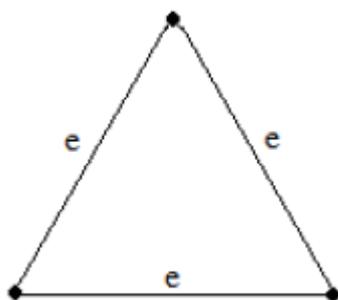
R₁ é a resistência de 1 haste, calculada pela equação (1).

2.3.3 Dimensionamento de um sistema com hastes em triângulo

Neste sistema as hastes são posicionadas em forma de um triângulo equilátero (Figura 10), interligados por cabo de dimensão conforme a Tabela 1 de acordo com a NBR 5419-3:2015.

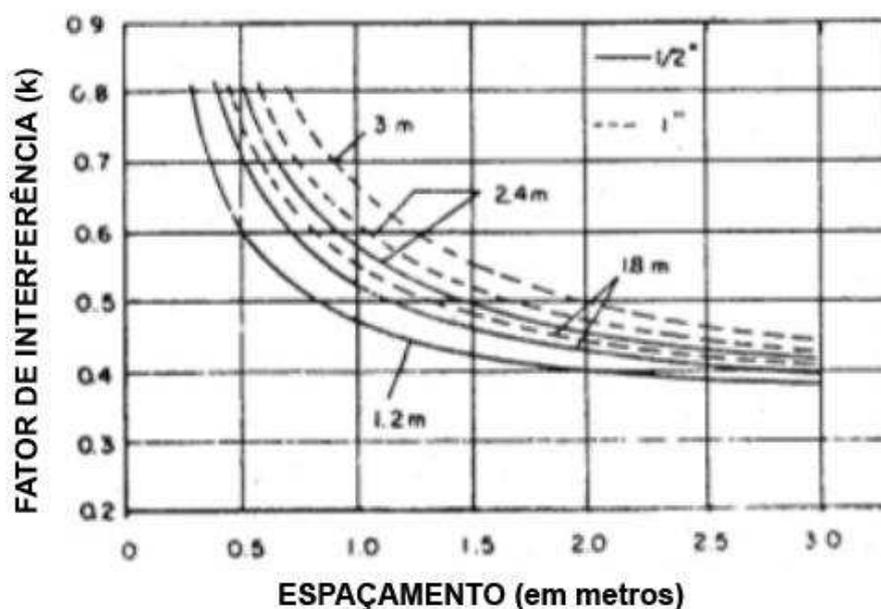
Conforme KINDERMANN; CAMPAGNOLO (1995), o dimensionamento do sistema em triângulo, baseia-se na definição do índice de redução “k”. Para este sistema o índice de redução “k” tem uma variação conforme o lado do triângulo, o que pode ser visto na Figura 11, as curvas são para hastes de 1/2” e 1”, com comprimentos de 1,2, 1,8, 2,4 e 3,0 metros.

Figura 10 - Hastes em triângulo equilátero.



Fonte: PINHEIRO, 2013

Figura 11 – Curva do fator de interferência para hastes de 1/2” e 1”, a profundidade de 1,2, 1,8, 2,4 e 3,0 metros



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995.

2.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Uma vez que a resistividade pode variar de acordo com as características físicas e químicas do solo, torna-se importante especializar tais características, tendo como base o mapeamento geotécnico.

Zuquette (1987) define o mapeamento geotécnico como um processo de levantar, caracterizar, classificar, avaliar e analisar os atributos que compõem meios geológicos. Estas informações podem ser tratadas para que possam ser relacionadas e interpretadas e, ao final, gerar mapas informativos da região de estudo.

Pode-se utilizar o mapeamento geotécnico para relacionar informações de geologia e pedologia com o comportamento do solo da área de estudo. Assim, para este trabalho, foram utilizadas as informações de classificação geotécnica, através do mapeamento geotécnico do município de São José, realizado pela equipe do LAMGEO (Laboratório de Mapeamento Geotécnico), e os dados de resistividade do solo, que serão determinados com base em ensaios executados em campo.

2.4.1 Classificação geotécnica

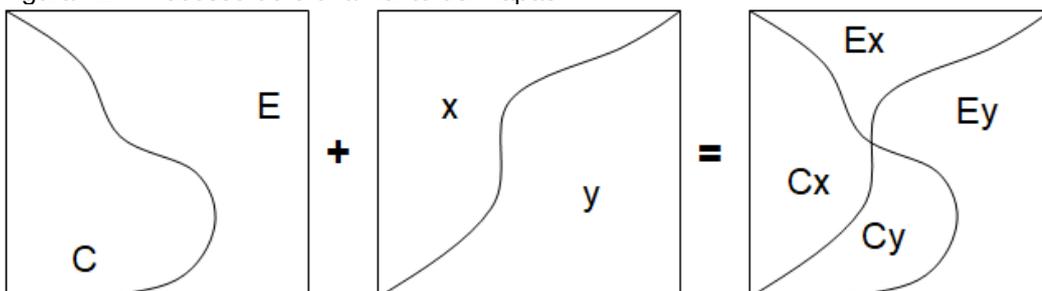
A classificação geotécnica tem o objetivo de estabelecer regiões cujo o comportamento geotécnico do solo é semelhante, assim constituindo unidades geotécnicas (DAVISON DIAS, 1995).

A metodologia de mapeamento geotécnico de grandes áreas proposta por Davison Dias (1995) baseia-se na formulação de um mapa temático geotécnico, onde os mapas litológico, oriundo de um mapa geológico, e pedológico são utilizados para a formulação de unidades geotécnicas (polígonos) com estimativas de comportamento geomecânico semelhante (LAMGEO, 2015).

Assim, pode-se utilizar os mapas geológico e pedológicos como base para a geração do Mapa de Estimativa de Unidades Geotécnicas, como representado pela Figura 12.

A classificação de uma unidade geotécnica é estimada usando a seguinte simbologia: "ABCxyz", onde as letras maiúsculas "ABC" correspondem à classificação pedológica e as minúsculas "xyz", identificadoras da geologia.

Figura 12 - Processo de cruzamento de mapas



Fonte: LAMGEO, 2015.

A classificação de solo no Brasil segue o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), sendo categorizados em 6 níveis (Ordem, Subordem, Grandes grupos, Subgrupos, Família e Series).

Davison Dias (1995) propõe uma padronização de nomenclatura para pedologia (Quadro 1) e geologia (Quadro 2).

Quadro 1 - Simbologia simplificada das classes pedológicas

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados
AQ	Areia Quartzosa	PB	Podzólico Bruno-Acidentado
B	Brunizém	PE	Podzólico Vermelho-Escuro
BV	Brunizém Vértico	PL	Planossolo
C	Cambissolo	PLV	Planossolo Vértico
CB	Cambissolo Bruno	PLP	Planossolo Plíntico
GH	Gleí	PT	Plintossolo
HO	Solo Orgânico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
LA	Latossolo Amarelo	R	Litólico
LB	Latossolo Bruno	TR	Terra Roxa Estruturada
LBC	Latossolo Bruno Câmbico	TB	Terra Bruna-Estruturada
LBR	Latossolo Bruno-Roxo	TBR	Terra Bruna-Roxa
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	TBV	Terra Bruna Podzólica
LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo		

Fonte: THIESEN apud Davison Dias (2001)

Quadro 2 - Simbologia simplificada da geologia

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
a	Arenito	g	Granito
ag	Argilito	gl	Granulito
an	Andesito	gn	Gnaisse
ar	Ardósia	gd	Granitóide
b	Basalto	ma	Mármore
br	Brecha	p	Pelito
c	Conglomerado	q	Quartzito
ca	Calcáreo	r	Riolito
cm	Complexo metamórfico*	si	Sienito
cr	Carvão	s	Siltito
d	Diorito	sq	Sedimentos quaternários
da	Dacito	st	Sedimentos terciários
f	Folhelho	x	Xisto

* Complexo formado por rochas metamórficas de difícil individualização

Fonte: THIESEN apud Davison Dias (2001)

2.4.2 Análise espacial de superfícies

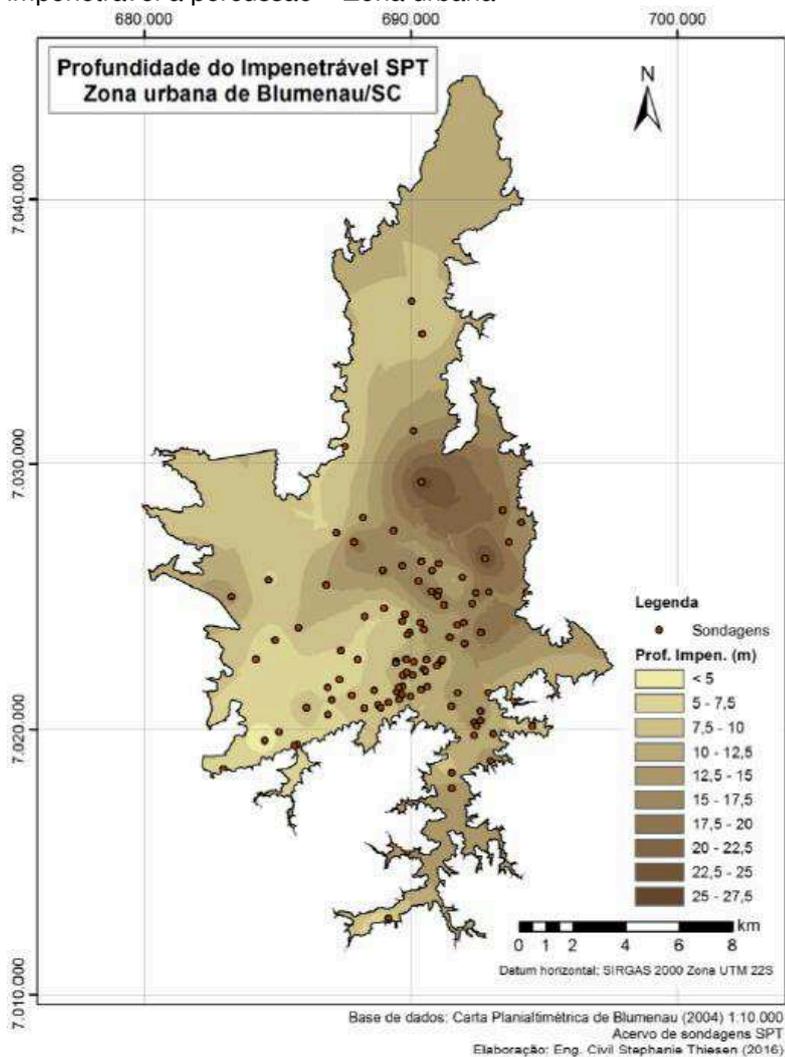
A análise espacial envolve o estudo de dados distribuídos em uma região de estudo, pretendendo mensurar propriedades relacionadas, levando em conta a

localização e o padrão do fenômeno de estudo (THIESEN, 2016). Considerando que o estudo deve relacionar dados espaciais, é uma característica intrínseca da análise espacial ser georeferenciada, ou seja, ter valores de localização.

Este estudo pode ser obtido na forma de interpolação, procedimento matemático de ajuste de uma função à pontos não amostrados, baseando-se em valores obtidos em pontos amostrados (LANDIM, 2000). Esta modelagem é feita por modelos estatísticos, podendo ser estocásticos (probabilísticos) ou determinísticos.

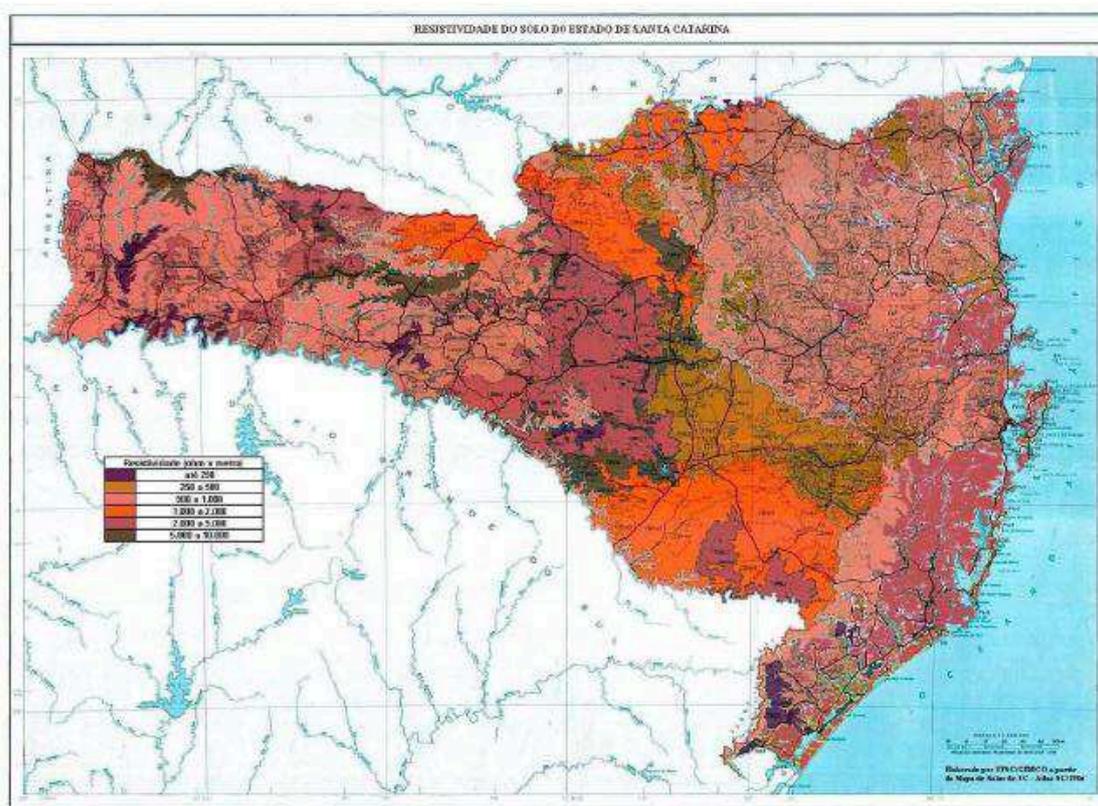
Nas Figuras 13 e 14 têm-se alguns exemplos de análise espacial. Na Figura 13 utilizou-se dados espacializados de SPT e técnicas de interpolação por Krigagem. Na Figura 14 foram utilizados dados das unidades geotécnicas do estado de Santa Catarina para gerar um mapa de classificação de resistividade do solo.

Figura 13 – Exemplo de análise espacial com a utilização de técnicas de interpolação - Superfície do impenetrável à percussão – Zona urbana



Fonte: THIESEN (2001, pg. 146).

Figura 14 – Exemplo de análise espacial com a utilização de técnicas de interpolação - Mapa de Resistividades dos Solos de Santa Catarina



Fonte: COELHO (2005, pg. 67).

A seguir, serão apresentados alguns dos métodos utilizados, como: triangulação linear, Inverso ponderado da distância e Krigagem.

2.4.2.1 Triangulação linear

Os pares de dados são unidos por linhas retas para formação de uma rede triangular (triangular network). Uma equação matemática (algoritmo) é utilizada para ajustar uma superfície através dos pontos de dados (LANDIM, 2000).

Os pontos estimados de igual valor (isovalores) entre os dados medidos e posicionados nos vértices dos triângulos são conectados para os intervalos especificados.

O Quadro 3, definido por LANDIM (2000), apresenta algumas vantagens e desvantagens no uso de Triangulação linear.

Quadro 3 - Triangulação linear – Vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de ser entendido; • Rápido; • Fiel aos dados originais; • Bom para uma visualização rápida; • Superfície pode ser interpolada entre os pontos amostrados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Valores acima ou abaixo dos valores reais não podem ser extrapolados; • Valores além da área de distribuição dos pontos amostrados não podem ser extrapolados; • Contornos podem ser 'angulares' nas bordas dos triângulos; • Gera superfícies angulares; • Rede triangular não é única e isso pode distorcer resultados.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de dados bem regular; • Valores estimados necessários apenas dentro da área amostrada; • Presença de grandes diferenças entre os dados (encostas íngremes, dados de contaminação com grande variabilidade); • Dados topográficos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ao se desejar um mapa com contornos suaves; • Alguns dados coletados em linhas e outros com distribuição irregular; • Com grande volume de dados computação pode tornar-se lenta.

Fonte: LANDIM, 2000.

2.4.2.2 Inverso ponderado da distância

Método utilizado para interpolação e geração de MDTs (modelos digitais de terreno), onde o peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó da grade a ser estimado. Pontos amostrados de localização próxima ao nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distante (LANDIM, 2000).

Segundo LANDIM (2000), o valor da soma dos pesos dos pontos vizinhos de um nó é sempre 1, ou seja, é atribuído um peso proporcional à contribuição de cada ponto vizinho. Quando a posição de uma observação coincide com um nó, seu valor recebe peso 1, enquanto todos os valores vizinhos recebem peso 0, assim, o resultado no nó é o valor amostrado.

O Quadro 4, definido por LANDIM (2000), apresenta algumas vantagens e desvantagens no uso do Inverso ponderado da distância.

Quadro 4 - Inverso ponderado da distância – Vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de entender matematicamente; • Algoritmo bem conhecido e discutido • Disponível em muitos softwares; • Utiliza pouco tempo de computação; • É razoavelmente fiel aos valores amostrados originais; • Não estima valores de Zi maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas; • Muito bom para analisar variações de pequena amplitude (anomalias) entre os dados irregularmente distribuídos; • Bom estimador para propósitos gerais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não estima valores de Zi maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; ruim para estimativas de dados estruturais, isto é, para determinar o topo ou a base de horizontes estratigráficos ou litológicos; • Muito difícil obter a localização precisa de uma determinada isolinha se os valores amostrados não contiverem este valor; é difícil projetar a curva de altitude zero se os dados não contiverem zero ou valores negativos; • Influência de valores locais anômalos é dificilmente removida; dados em clusters podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso; • Cria muitos artefatos, o que pode ser reduzido ou eliminado se o raio de busca for reduzido, se a tendência for removida previamente e se ocorrer mudanças no expoente utilizado, no tamanho da grade, no número de pontos utilizados e ponderação direcional.
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Estimativas de propósito gerais; • Distribuição uniforme de dados; • Boa densidade de dados; • Para destacar anomalias locais; • Para calcular volume em operações entre grids. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dados agrupados; • Tendência pronunciada presente; • Dados com falhas e distribuídos de forma esparsa; • Não quiser artefatos.

Fonte: LANDIM, 2000.

2.4.2.3 Krigagem

Método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas, onde deve existir uma certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido (LANDIM, 2000).

Este método utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis pelo qual os pesos adequados são obtidos a partir de um variograma, representativo da média das diferenças ao quadrado dos valores irregularmente distribuídos de Zi a

intervalos de distâncias especificados (lags). Quando um variograma é adequadamente elaborado, a estimativa por krigagem resultante é reconhecida como sendo a estimativa linear melhor e não tendenciosa.

O Quadro 5, definido por LANDIM (2000), apresenta algumas vantagens e desvantagens no uso da Krigagem.

Quadro 5 - Krigagem – Vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Valores estimados baseiam-se no variograma; se for apropriado, fornece as seguintes informações: <ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade; • Parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsoide) e, se elipsoide, orientação do eixo principal; • Parâmetros adequados da grade: tamanho das células, forma e orientação; • Natureza da distribuição espacial da variável investigada: uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial x casual; • Previsibilidade da variação espacial da variável avaliada. • Se o variograma for apropriado controla a krigagem, com as seguintes vantagens: <ul style="list-style-type: none"> • Evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados; • Permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade: o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); • Permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; • Precisão, contornos suaves, artefatos indesejáveis raros a não ser nas bordas do mapa. • Interpolador exato: os valores estimados para os nós das células é 	<ul style="list-style-type: none"> • O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto resultados são sempre obtidos; • É necessário tempo para preparo do variograma e entendimento de geoestatística; • Pode não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos; • Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos; • Necessidade de software capacitado.

<p>exatamente igual ao valor amostrado naquela posição; Estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modela tanto tendências regionais quanto anomalias locais; • Calcula variâncias dos pontos estimados (erros), que podem ser utilizadas para: <ul style="list-style-type: none"> • Quantificar um intervalo de valores (\pm) para os pontos estimados, definindo estimativas realistas; • Calcular intervalos de confiança para verificar a probabilidade dos valores ocorrerem dentro de um intervalo de ± 2 unidades de desvio padrão da média; variâncias mapeadas podem indicar locais para adensamento da amostragem. 	
Quando usar	Quando não usar
<ul style="list-style-type: none"> • Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais; • Anomalia local não presente em toda a área, por ex. em ambiente fluvial; • Quiser estimar com base em uma média global; • Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados (clustered). 	<ul style="list-style-type: none"> • Menos de 30 pontos amostrados: número insuficiente de pares para modelar o variograma. • Valores discrepantes de Z: removê-los antecipadamente. • Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado). • Amostras de populações Diversas

Fonte: LANDIM, 2000.

2.4.3 Resolução espacial

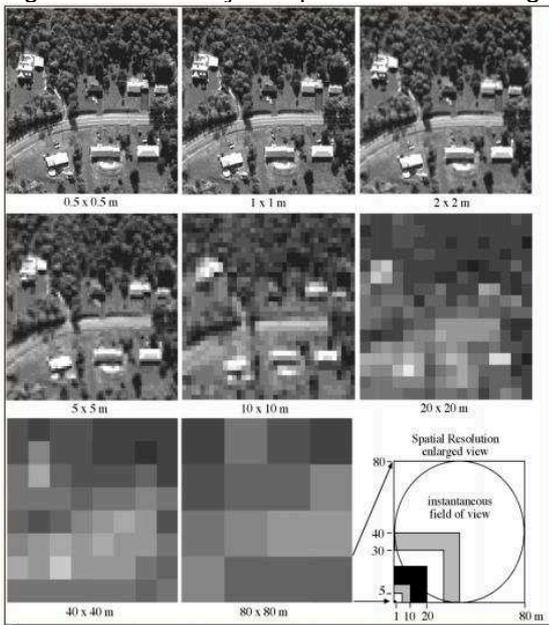
A confiabilidade dos dados é muito importante quando se trabalha com dados espaciais. No domínio espacial, a resolução espacial parece ser uma dimensão mais relevante que a escala (THIESEN, 2016).

Tobler (1979, apud SILVA, 1999) define resolução espacial de dados georreferenciados como o conteúdo do domínio geométrico dividido pelo número de observações, normalizadas pela dimensão espacial, conforme Equação (8), onde, o domínio geométrico representa a área da região de estudo. Assim, uma alta resolução espacial relaciona-se a um maior nível de detalhes dos elementos, portanto, um número maior de observações.

$$\text{Resolução espacial} = \sqrt{\frac{\text{Área}}{\text{Observações}}} \quad (8)$$

A resolução espacial também é um parâmetro aplicável para a nitidez de uma imagem, como exemplificado pela Figura 15. É possível observar a variação da nitidez com a variação da resolução espacial que inicia com pixels de tamanho de 0,5m de lado, chegando a pixels com 80m de lado.

Figura 15 - Resolução espacial em uma imagem

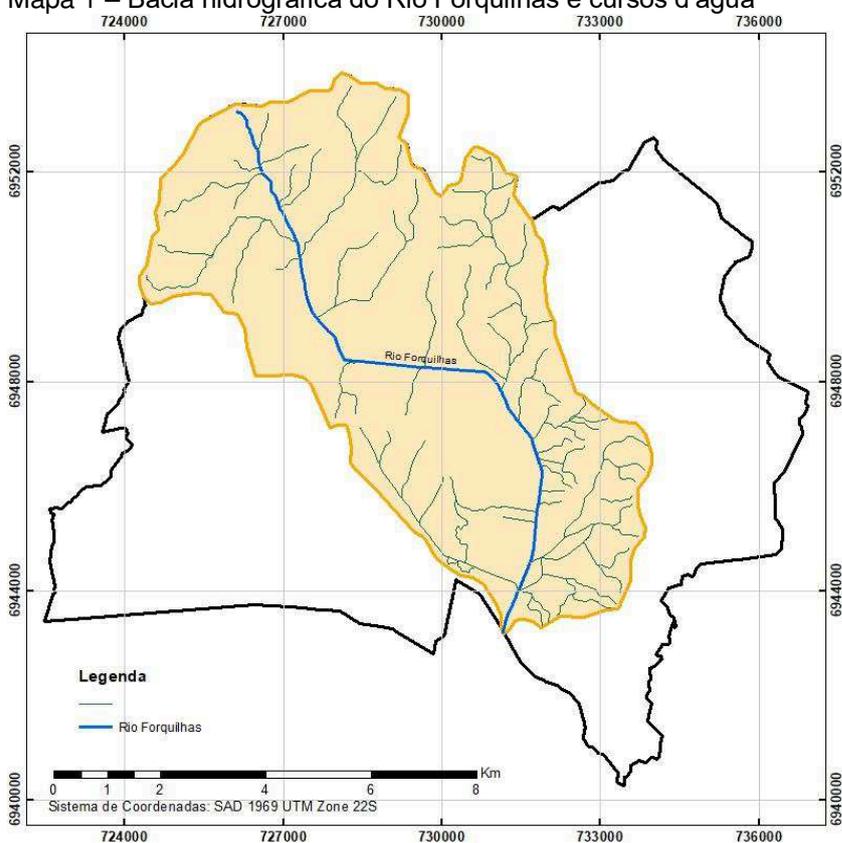


Fonte: INPE, 2016

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

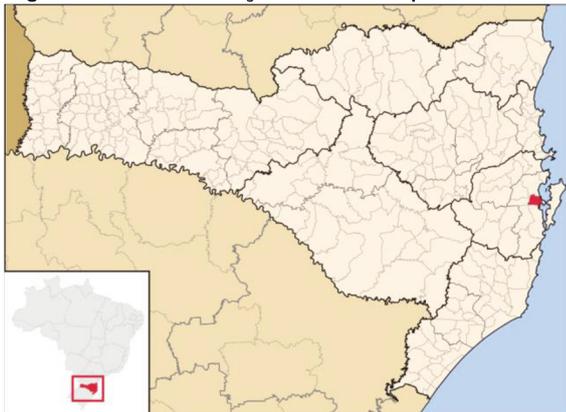
A bacia hidrográfica do Rio Forquilhas, representada no Mapa 1, encontra-se localizado no município de São José, mostrado na Figura 16, fazendo parte da região hidrográfica 8 (Litoral Centro) do estado de Santa Catarina, região “RH8” na Figura 17. A área de estudo foi escolhida devido à facilidade de acesso e interesse no mapeamento da região. Optou-se por manter as medições na mesma bacia hidrográfica, pois a resistividade é influenciada pela umidade do solo, e utilizando-se a mesma bacia hidrográfica minimizam-se erros de leitura de um ponto para outro devido às precipitações.

Mapa 1 – Bacia hidrográfica do Rio Forquilhas e cursos d'água



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16 – Localização do município de São José no estado de Santa Catarina



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Jos%C3%A9_\(Santa_Catarina\)#/media/File:SantaCatarina_Municip_SaoJose.svg](https://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Jos%C3%A9_(Santa_Catarina)#/media/File:SantaCatarina_Municip_SaoJose.svg) (Setembro, 2017)

Figura 17 – Regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina

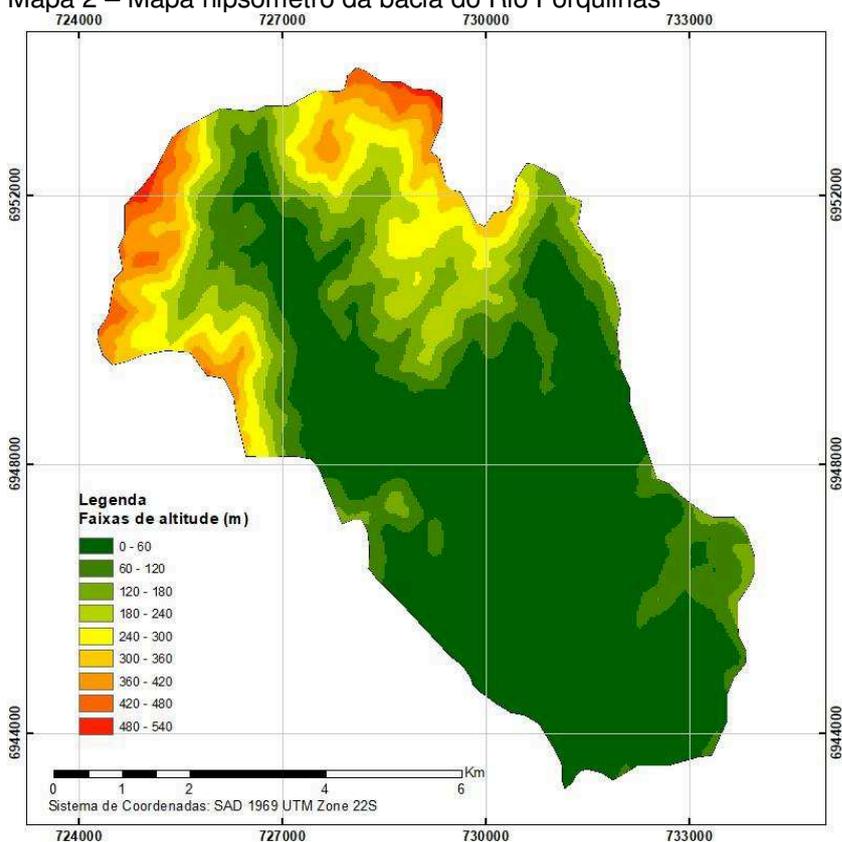


Fonte: <http://www.aguas.sc.gov.br/a-bacia-rio-do-peixe/regiao-hidrografica-rio-do-peixe> (Setembro, 2017)

Utilizaram-se os dados encontrados na mapoteca digital da Epagri para a elaboração dos mapas para o estudo da região, assim, tem-se o Mapa 1, mostrando a localização da bacia dentro do município de São José, com área total de 52,9552 Km².

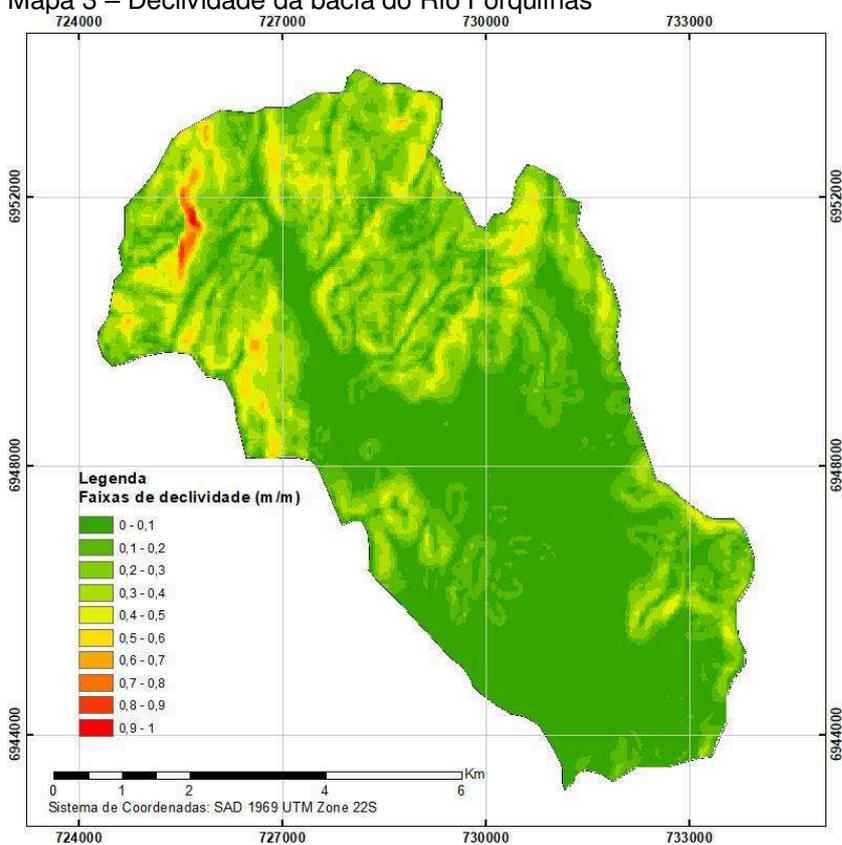
A região tem uma altitude baixa, tendo mais de 50% de sua área abaixo dos 60 metros, como se pode verificar no Mapa 2. Sua declividade também é baixa, tendo mais de 45% de sua área com declividade abaixo de 10%, apresentado no Mapa 3. A declividade é um dado importante, pois a mesma depende das características físicas do solo e a umidade no mesmo, que também são dados relevantes para a determinação da resistividade.

Mapa 2 – Mapa hipsômetro da bacia do Rio Forquilhas



Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 3 – Declividade da bacia do Rio Forquilhas

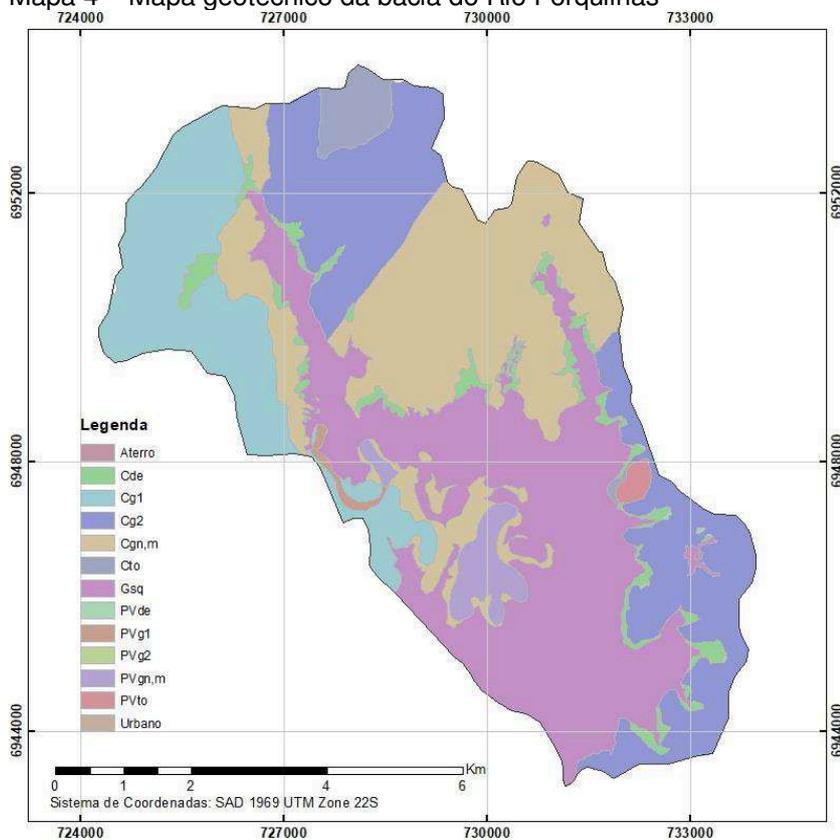


Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Mapa geotécnico

Com as informações de classificação geotécnica, através do mapeamento geotécnico do município de São José, realizado pela equipe do LAMGEO em 2015, pode-se analisar o solo da região de estudo, apresentado no Mapa 4. A distribuição dos solos esta conforme a Tabela 11, onde foram agrupados as unidades geotécnicas “Cg1” e “Cg2” e as unidades “PVg1” e “PVg2”, pois apresentam características semelhantes.

Mapa 4 – Mapa geotécnico da bacia do Rio Forquilhas



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 - Unidades geotécnicas e suas respectivas áreas

Unidade Geotécnica	Denominação	Área (Km ²)	%
Aterro	Aterros	0,0054	0,01%
Cde	Cambissolo de substrato depósito de encosta	1,8781	3,55%
Cg	Cambissolo de substrato granito	18,9448	35,78%
Cgn,m	Cambissolo de substrato gnaisse e migmatito	13,0786	24,70%
Cto	Cambissolo de substrato tonalito	1,0863	2,05%
Gsq	Glei de substrato sedimentos quaternários	16,2258	30,64%
PVde	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato depósito de encosta	0,0452	0,09%
PVg	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito	0,2093	0,40%
PVgn,m	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaisse e migmatito	1,2425	2,35%
PVto	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato tonalito	0,2342	0,44%
Urbano	Área urbanizada	0,0049	0,01%
	Total	52,9552	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

Os pontos para o dimensionamento foram escolhidos, sempre que possível, tentando abranger os vários tipos de solos, para posterior comparação entre os tipos de solo e a resistividade medida. Porém, é necessário levar em conta que o tipo de solo não é a única característica relevante, assim, podendo não ter relação direta.

Os principais solos encontrados, considerando-se apenas a pedologia da região, são o Glei (Gleissolo), Cambissolo e Podzólico (Argissolo), uma breve descrição, conforme a sua Ordem e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, encontra-se no Quadro 6.

Quadro 6 - Classificação e descrição das ordens

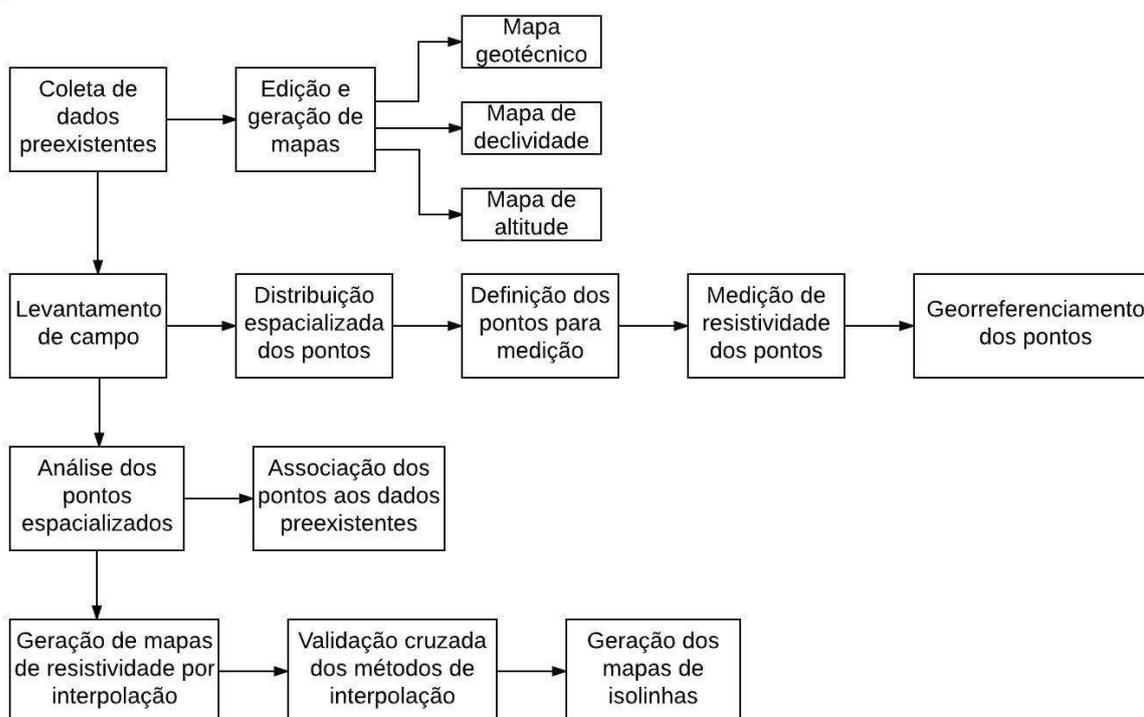
Argissolos	Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, e satisfazendo, ainda, os seguintes requisitos: a) Horizonte plíntico, se presente, não satisfaz os critérios para Plintossolo; b) Horizonte glei, se presente, não satisfaz os critérios para Gleissolo. Símbolo: P
Cambissolos	Solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta. Plintita e petroplintita, horizonte glei e horizonte vértico, se presentes, não satisfazem os requisitos para Plintossolos, Gleissolos e Vertissolos, respectivamente. Símbolo: C
Gleissolos	Gleissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 150 cm da superfície do solo ou a profundidades entre 50 cm e 150 cm desde que imediatamente abaixo de horizonte A ou E, ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Não apresentam horizonte vértico ou horizonte B plânico acima ou coincidente com horizonte glei, tampouco qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte glei ou textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes até a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico. Horizonte plíntico, se presente, deve estar à profundidade superior a 200 cm da superfície do solo. Símbolo: G

Fonte: Embrapa, 2017.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Fez-se o processo de levantamento e análise em 4 etapas, sendo estas etapas representadas na Figura 18.

Figura 18 – Método de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 COLETA DE DADOS PREEXISTENTES

A coleta de dados está representada no capítulo 3, de caracterização da área de estudo.

Foram coletados os dados de altitude da mapoteca digital da Epagri para a geração dos mapas de declividade e altitude. Utilizou-se o mapa geotécnico digital criado pela equipe do LAMGEO para a análise das unidades geotécnicas.

4.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Fez-se uma pré-alocação de pontos para posterior medição, sendo considerada a resolução espacial, a unidade geotécnica e a facilidade de acesso.

4.2.1 Definição de pontos de medição

A resolução espacial está diretamente relacionada com o número de observações, assim, é necessário verificar a resolução mínima que se deseja no resultado final, para decidir o número de observações a serem feitas. Utilizando-se da Tabela 12 optou-se por uma resolução inicial de trabalho de 1:50.000, assim, a distância entre pontos de observação deve ficar abaixo de 1826 m. Pela Equação (8), pode-se verificar que é necessário no mínimo 16 observações, porém estes pontos devem estar bem distribuídos na região de estudo para se obter um resultado mais consistente.

Tabela 12 - Número mínimo de observações

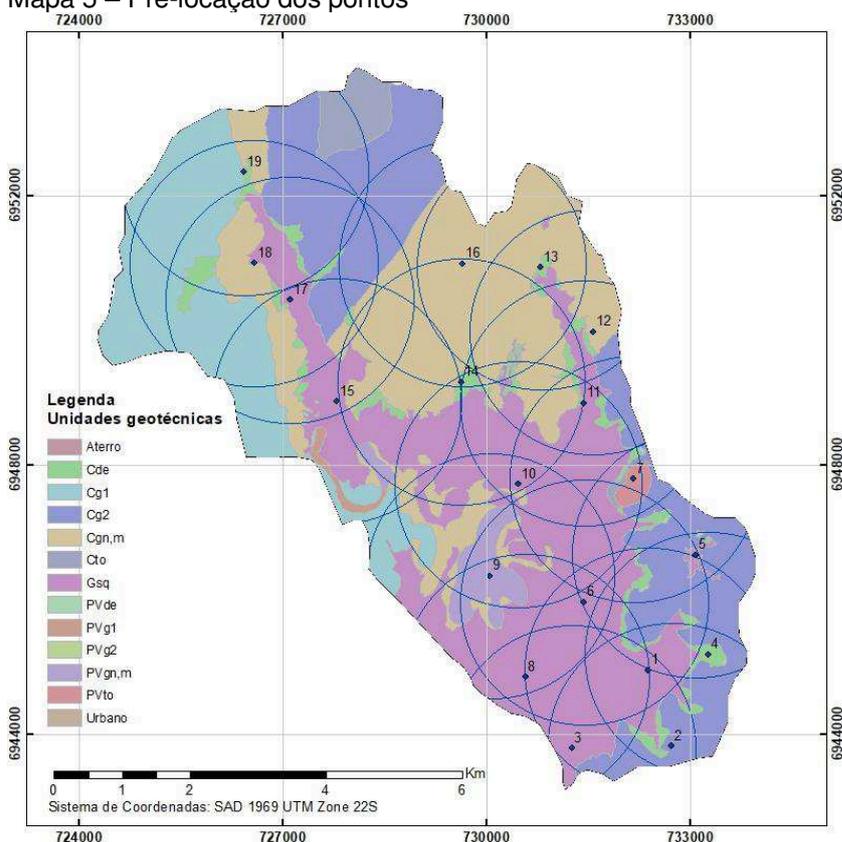
Finalidade do mapeamento geotécnico	Escala	Atributos					
		Qualitativos				Quantitativos	
		Metamórficas e Ígneas		Sedimentares		Geral	
		Observações/km ²	Distância entre os pontos observados (m)	Observações/km ²	Distância entre os pontos observados (m)	Observações/km ²	Distância entre os pontos observados (m)
Básico	1:250.000	1/10	3162	1/10	3162	1/10	3162
Regional	1:100.000	4/10	1581	3/10	1826	2/10	2236
	1:50.000	6/5	913	1/1	1000	3/10	1826
	1:25.000	3/1	577	2/1	707	1/1*	1000
Detalhe	1:25.000	5/1	447	4/1	500	4/1*	500
	1:10.000	15/1	258	15/1	258	10/1	316
	1:5.000	25/1	200	20/1	224	15/1	258
	1:2.000	40/1	158	35/1	169	25/1	200

* Valores alterados conforme contato realizado com Prof. Zuquette em 29/4/2016

Fonte: THIESEN (2016)

Verificadas as condições de resolução espacial, unidades geotécnicas e acessibilidade elaborou-se o Mapa 5, mostrando os pontos a se fazer a medição de resistividade do solo. Os círculos no mapa têm raio de 1826 m, os pontos foram colocados observando esta distância entre eles e deixando o mínimo possível de área não atingida, locando-os em unidades geológicas distintas. Ressalta-se que as áreas ao norte são locais de difícil acesso, de mata fechada, assim não sendo possível fazer o levantamento de resistividade destes locais.

Mapa 5 – Pré-locação dos pontos



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Método de medição

A cada ponto fez-se a medição de resistividade do solo, pelo método dos quatro eletrodos com o arranjo de Wenner. Retirou-se uma amostra superficial do solo, para medição do teor de umidade em laboratório e registrou-se a posição do GPS através de software no aparelho celular.

4.2.2.1 Medição de resistividade do solo

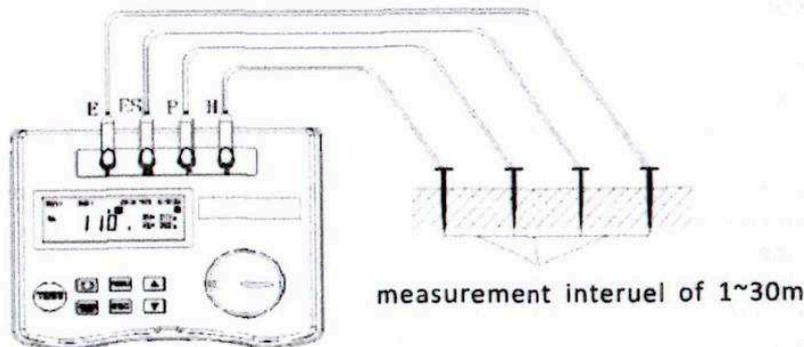
A medição dos pontos pelo arranjo de Wenner foi feita com o terrômetro digital da Impac, modelo ITRD-400, Figura 6, devidamente calibrado e aferido conforme registro no Anexo A.

Em cada ponto foram feitas três medições, com as hastes a 2 metros, 2,5 metros e 3 metros entre elas, assim obtendo como resultado as resistividades nestas respectivas profundidades.

Utilizando-se uma trena de 20 metros, posiciona-se as hastes nas posições adequadas conforme a distância entre elas desejada. As hastes são ligadas ao

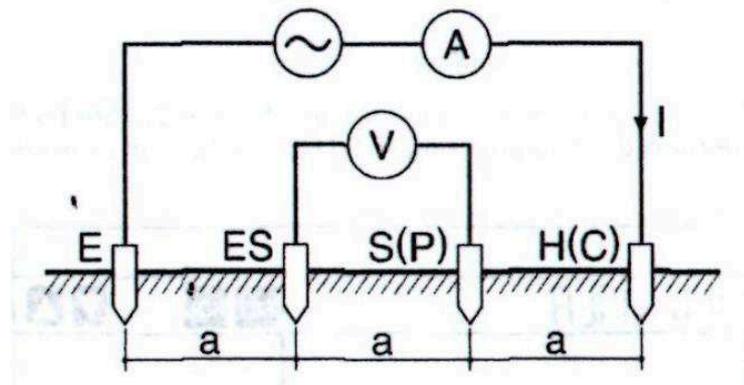
aparelho conforme o esquema da Figura 19. O aparelho faz o teste para medida de resistência inserindo uma corrente alternada “I” entre as hastes “E” e “H(C)”, e medindo a diferença de potencial “V” entre as hastes “ES” e “S(P)”, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 19 – Esquema de conexão das hastes para teste de resistência



Fonte: Manual de instruções do termômetro ITRD-400

Figura 20 – Princípio de medição de resistência de terra pelo arranjo de wenner



Fonte: Manual de instruções do termômetro ITRD-400

As medições obtidas são de resistência do sistema, utilizando-se a Equação (6), sempre observando a condição de que as hastes devem ficar enterradas a menos de 10% da distância entre elas, obtêm-se a resistividade do solo na profundidade equivalente a distância entre as hastes.

A Figura 21 mostra o aparelho montado para a medição de resistência de terra no ponto 4.

Figura 21 – Medição de resistência no ponto de medição 4



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2.2 Medição do teor de umidade natural

Foram recolhidas amostras superficiais do solo, para posterior medição do teor de umidade. Para a medição de umidade do solo, deveria ser feita com o solo retirado a profundidade adequada com a resistividade requerida, porém, este procedimento seria inviável para o trabalho. Assim, optou-se por recolher apenas as amostras superficiais, que apesar de não serem as mais adequadas, podem ser relevantes para verificação de anomalias no resultado das medições de resistividade do solo.

As medições de teor de umidade foram feitas conforme a NBR 6457:2016 (Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização), com o auxílio de estufa. Para a determinação da umidade utiliza-se a Equação (9).

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (9)$$

Onde,

w é o teor de umidade, expresso em porcentagem (%);

M₁ é a massa do solo úmido mais a massa do recipiente, expressa em gramas (g);

M₂ é a massa do solo seco mais a massa do recipiente, expressa em gramas (g);

M₃ é a massa do recipiente, expressa em gramas (g).

4.2.2.3 Coordenadas dos pontos medidos

Registrou-se as coordenadas dos pontos, para posterior correção na locação dos mesmos. O registro foi feito através do software “GPS Test”, que mostra as coordenadas geográficas do local, capturada pelo sensor GPS do celular, conforme Figura 22. O elipsoide de referência do sensor é o WGS84. A cada ponto fez-se duas medições, para calcular a média.

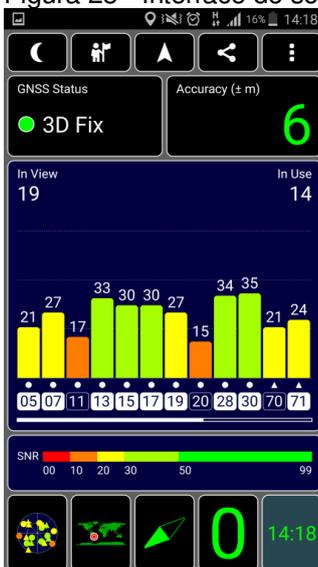
Figura 22 – Interface do software GPS Test – coordenadas geográficas



Fonte: captura de tela do software GPS Test

O software também apresenta a precisão da posição, assim capturou-se a precisão apresentada a cada captura da posição do GPS, apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Interface do software GPS Test – precisão da coordenada geográfica



Fonte: captura de tela do software GPS Test

4.2.3 Georreferenciamento dos pontos

Após coletar-se as coordenadas geográficas dos 19 pontos, fez-se a correção da sua localização no mapa georreferenciado, utilizando-se a média das duas coordenadas geográficas registradas a cada ponto.

4.3 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES

Os pontos foram analisados e separados por sua unidade pedológica. Correlacionando os dados de declividade, altitude e teor de umidade da amostra superficial com a resistividade medida.

A correlação foi testada através de regressão linear, comparando o coeficiente de determinação (R^2). Fez-se, também, regressões lineares múltiplas, correlacionando mais de uma variável com a resistividade do solo, neste caso, além do coeficiente de determinação, comparou-se o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado).

A inclusão de inúmeras variáveis, mesmo que tenham muito pouco poder explicativo sobre a variável dependente, aumentarão o valor de R^2 . Isto incentiva a inclusão indiscriminada de variáveis. Para combater esta tendência, podemos usar o R^2 ajustado, que penaliza a inclusão de regressores pouco explicativos.

4.4 GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

Gerou-se mapas de resistividade da área de estudo, utilizando as técnicas de interpolação mais adequadas para os valores obtidos em campo. Fazendo-se a validação cruzada para a determinação do método mais adequado de interpolação para este trabalho. Determinando-se o melhor método, fez-se, mapa de isolinhas de resistividade para cada profundidade estudada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADO DAS MEDIÇÕES

Na Tabela 13 encontram-se os resultados dos registros de coordenadas geográficas pelo GPS do celular.

Com as medições realizadas nos 19 pontos, apresentadas na Tabela 14, calculou-se a resistividade do solo para cada ponto utilizando a Equação (6). Fez-se a média das coordenadas geográficas capturadas e registrou-se o resultado do teste do teor de umidade do solo das amostras superficiais. Os dados calculados de resistividade, teor de umidade natural e localização podem ser encontrados na Tabela 15. Finalmente, na Tabela 16, pode-se verificar uma comparação prévia da resistividade de cada ponto e seus dados mais relevantes (umidade natural da amostra superficial, unidade geotécnica, declividade do terreno e altitude).

No ponto 5 realizou-se apenas a 1ª medição da coordenada geográfica devido a uma falha no aparelho. No ponto 18, com o arranjo espaçado a 2,0 metros, o aparelho apresentou a falha “high voltage”, o qual não há menção no manual, assim não pode ser feita a medição de resistividade no ponto 18 a 2,0 metros.

Tabela 13 – Resultado do levantamento das coordenadas geográficas

Ponto	Coordenada geográfica (1ª medição)			Coordenada geográfica (2ª medição)		
	Longitude	Latitude	Precisão (em m)	Longitude	Latitude	Precisão (em m)
1	48°38'41,657"	27°35'55,214"	12	48°38'41,618"	27°35'55,138"	6
2	48°38'29,027"	27°36'32,140"	12	48°38'29,073"	27°36'32,226"	8
3	48°39'42,147"	27°36'25,702"	6	48°39'42,276"	27°36'25,544"	8
4	48°38'09,695"	27°35'46,829"	6	48°38'09,677"	27°35'46,870"	8
5	48°38'20,058"	27°35'01,819"	4	-	-	-
6	48°39'22,989"	27°35'25,641"	8	48°39'23,042"	27°35'25,620"	6
7	48°38'51,392"	27°34'27,237"	8	48°38'51,372"	27°34'27,227"	12
8	48°39'52,571"	27°36'01,973"	6	48°39'52,564"	27°36'01,906"	6
9	48°40'05,729"	27°35'10,080"	6	48°40'05,897"	27°35'09,984"	6
10	48°39'56,595"	27°34'30,286"	12	48°39'56,595"	27°34'30,286"	12
11	48°39'18,874"	27°33'46,371"	6	48°39'18,891"	27°33'46,413"	6
12	48°39'18,312"	27°33'18,124"	6	48°39'18,325"	27°33'18,159"	8
13	48°39'44,848"	27°32'43,736"	8	48°39'44,757"	27°32'43,775"	6
14	48°40'25,481"	27°33'38,103"	8	48°40'25,465"	27°33'38,221"	8
15	48°41'29,250"	27°33'51,220"	4	48°41'29,249"	27°33'51,243"	6
16	48°40'05,201"	27°33'06,751"	12	48°40'05,201"	27°33'06,751"	8
17	48°41'58,288"	27°33'00,826"	12	48°41'58,275"	27°33'00,830"	8
18	48°42'22,529"	27°32'40,529"	8	48°42'22,387"	27°32'40,490"	8
19	48°42'23,807"	27°31'58,983"	6	48°42'23,794"	27°31'58,943"	16

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 – Resultado do levantamento de campo das resistividades do solo

Ponto	Data	Resistência (em Ω)		
		3,0 m	2,5 m	2,0 m
1	18/09/2017	7,3	8,4	10,1
2	23/09/2017	8,1	9,8	12,0
3	23/09/2017	2,6	3,2	4,9
4	23/09/2017	7,6	11,1	14,4
5	23/09/2017	5,3	7,2	9,4
6	22/09/2017	3,3	3,3	3,5
7	23/09/2017	9,4	10,2	4,9
8	22/09/2017	21,0	27,0	36,0
9	23/09/2017	29,0	36,0	63,0
10	23/09/2017	21,0	22,0	20,0
11	23/09/2017	3,9	4,5	4,6
12	23/09/2017	25,0	33,0	42,0
13	23/09/2017	12,6	18,6	25,0
14	23/09/2017	13,3	17,1	24,0
15	22/09/2017	24,0	23,0	26,0
16	23/09/2017	35,0	37,0	40,0
17	22/09/2017	3,8	4,0	5,2
18	22/09/2017	59,0	26,0	-
19	22/09/2017	25,0	32,0	42,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 – Dados de resistividade, teor de umidade e localização dos pontos

Ponto	Coordenada geográfica (média)		Resistividade (em Ω m)			Teor de umidade superficial
	Longitude	Latitude	3,0 m	2,5 m	2,0 m	
1	48°38'41,637"	27°35'55,176"	137,60	131,95	126,92	10,16%
2	48°38'29,050"	27°36'32,183"	152,68	153,94	150,80	14,64%
3	48°39'42,212"	27°36'25,623"	49,01	50,27	61,58	11,44%
4	48°38'09,686"	27°35'46,850"	143,26	174,36	180,96	4,42%
5	48°38'20,058"	27°35'01,819"	99,90	113,10	118,12	10,74%
6	48°39'23,016"	27°35'25,631"	62,20	51,84	43,98	20,68%
7	48°38'51,382"	27°34'27,232"	177,19	160,22	61,58	1,75%
8	48°39'05,813"	27°36'01,940"	395,84	424,12	452,39	1,60%
9	48°40'05,813"	27°35'10,032"	546,64	565,49	791,68	10,31%
10	48°39'56,595"	27°34'30,286"	395,84	345,58	251,33	9,97%
11	48°39'18,882"	27°33'46,392"	73,51	70,69	57,81	5,78%
12	48°39'18,318"	27°33'18,142"	471,24	518,36	527,79	9,78%
13	48°39'44,802"	27°32'43,755"	237,50	292,17	314,16	2,63%
14	48°40'25,473"	27°33'38,162"	250,70	268,61	301,59	20,55%
15	48°41'29,249"	27°33'51,232"	452,39	361,28	326,73	1,35%
16	48°40'05,201"	27°33'06,751"	659,73	581,19	502,65	1,22%
17	48°41'58,282"	27°33'00,828"	71,63	62,83	65,35	7,69%
18	48°42'22,474"	27°32'40,509"	1112,12	408,41	-	5,23%
19	48°42'23,800"	27°31'58,963"	471,24	502,65	527,79	2,03%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 – Comparação de dados relevantes à resistividade dos pontos

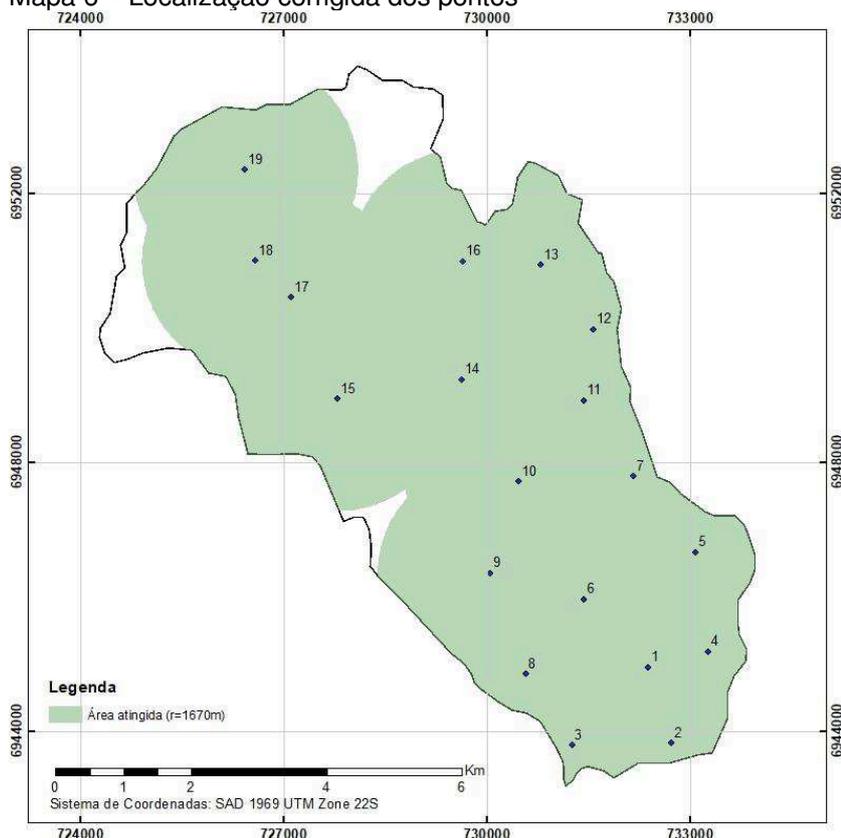
Ponto	Resistividade (em Ω m)			Teor de umidade superficial	Unidade Geológica	Altitude (em m)	Declividade (em m/m)
	3,0 m	2,5 m	2,0 m				
1	137,60	131,95	126,92	10,16%	Gsq	9	0,0000
2	152,68	153,94	150,80	14,64%	Cg2	23	0,0083
3	49,01	50,27	61,58	11,44%	Gsq	6	0,0132
4	143,26	174,36	180,96	4,42%	Cde	18	0,0295
5	99,90	113,10	118,12	10,74%	Gsq	54	0,0177
6	62,20	51,84	43,98	20,68%	Gsq	10	0,0132
7	177,19	160,22	61,58	1,75%	PVto	70	0,3428
8	395,84	424,12	452,39	1,60%	Gsq	9	0,0333
9	546,64	565,49	791,68	10,31%	PVgn,m	26	0,0717
10	395,84	345,58	251,33	9,97%	Gsq	26	0,0243
11	73,51	70,69	57,81	5,78%	Gsq	16	0,0243
12	471,24	518,36	527,79	9,78%	Cgn,m	30	0,1357
13	237,50	292,17	314,16	2,63%	Cde	33	0,0972
14	250,70	268,61	301,59	20,55%	Cde	26	0,0592
15	452,39	361,28	326,73	1,35%	Cgn,m	22	0,0690
16	659,73	581,19	502,65	1,22%	Cgn,m	149	0,3294
17	71,63	62,83	65,35	7,69%	Gsq	25	0,0059
18	1112,12	408,41	-	5,23%	Cgn,m	46	0,1253
19	471,24	502,65	527,79	2,03%	Cde	47	0,0876

Fonte: Elaborado pelo autor

O Mapa 6 mostra os pontos com as localizações corrigidas. A precisão das leituras de localização do GPS foi de 8 metros, sendo a menor precisão de 16 metros, ocorrendo apenas uma vez no ponto 19.

Com a definição dos 19 pontos, pode-se calcular a resolução espacial, pela Equação (8), assim a distância entre pontos calculada é igual a 1670 metros, sendo menor que a recomendada pela Tabela 12 para a resolução de 1:50.000. A abrangência dos pontos pelo “R” calculado pode ser verificada no Mapa 6.

Mapa 6 – Localização corrigida dos pontos



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES

O número de pontos levantados é baixo para uma análise estatística adequada, em especial, considerando-se que os pontos estão espalhados em diferentes unidades geológicas, sendo necessário uma análise estatística para cada uma das unidades independentemente. A Tabela 17 mostra o número de observações em cada uma das unidades geológicas existentes na região de estudo, sendo a única unidade com um número significativo de observações “Glei de substrato sedimentos quaternários”. Optou-se, assim, por mesclar as unidades geológicas em sua classificação pedológica, visto que o escopo deste trabalho é em solo mais superficial (até 3 metros de profundidade).

Tabela 17 – Número de observações por área classificada

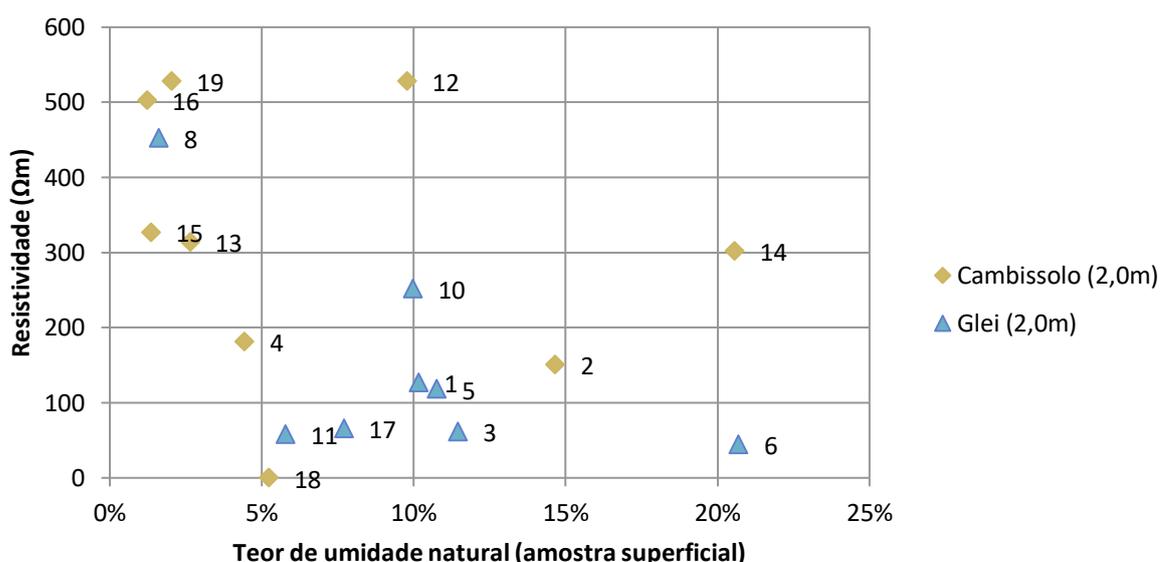
Unidade Geológica	Número de observações	Classificação Pedológica	Número de observações
Cde	4	Cambissolo	9
Cg	1		
Cgn,m	4		
Cto	0		
Gsq	8	Glei	8
PVde	0	Podzólico Vermelho-Amarelo	2
PVg	0		
PVgn,m	1		
PVto	1		
Total	19	Total	19

Fonte: Elaborado pelo autor

Dividindo-se as observações em suas respectivas classes, analisou-se, através de gráficos de dispersão e regressão linear, a correlação entre a resistividade, a declividade do terreno, a altitude e a umidade. As análises foram restringidas apenas ao Cambissolo e ao Glei, pois o Podzólico Vermelho-Amarelo apresenta apenas 2 observações, sendo inviável a análise dos dados.

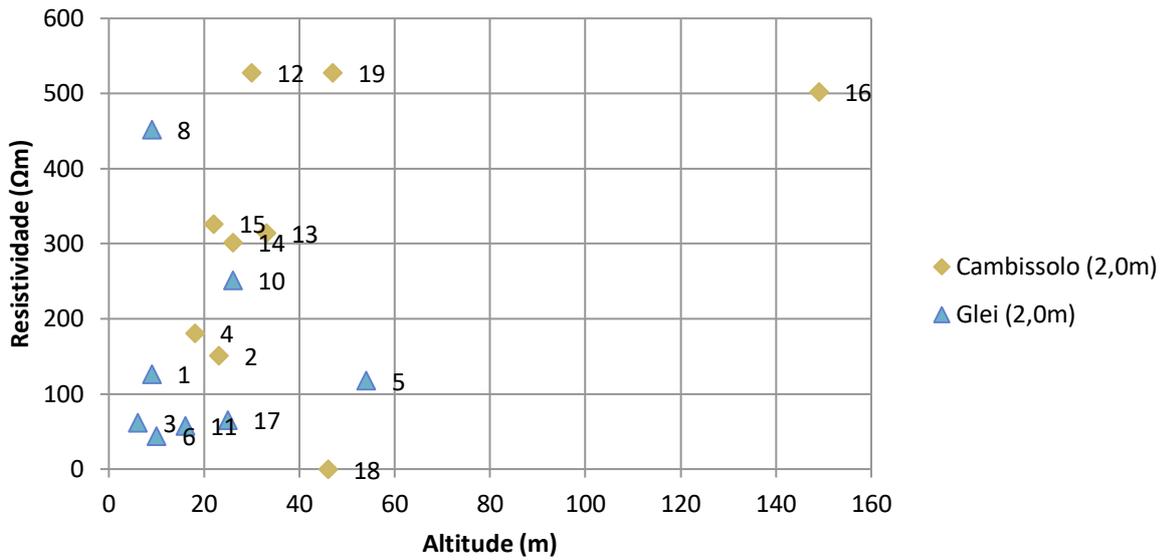
Nas Figuras 24 a 32 apresentam-se os gráficos de dispersão. Em cada um deles é possível ver uma correlação fraca entre cada uma das características relevantes individualmente.

Figura 24 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,0 metros de profundidade e teor de umidade



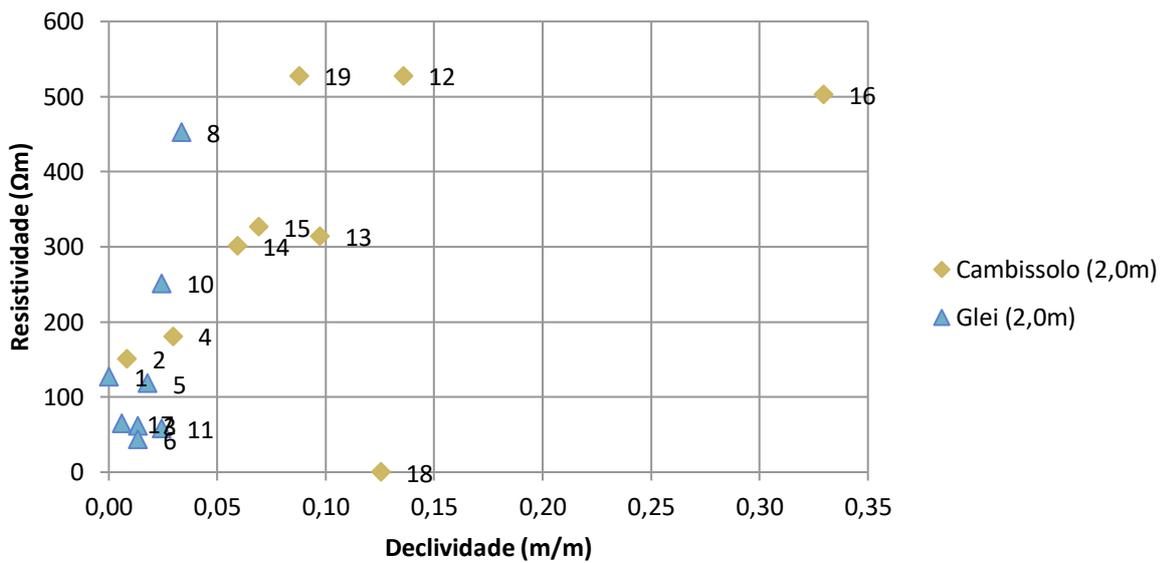
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,0 metros de profundidade e altitude



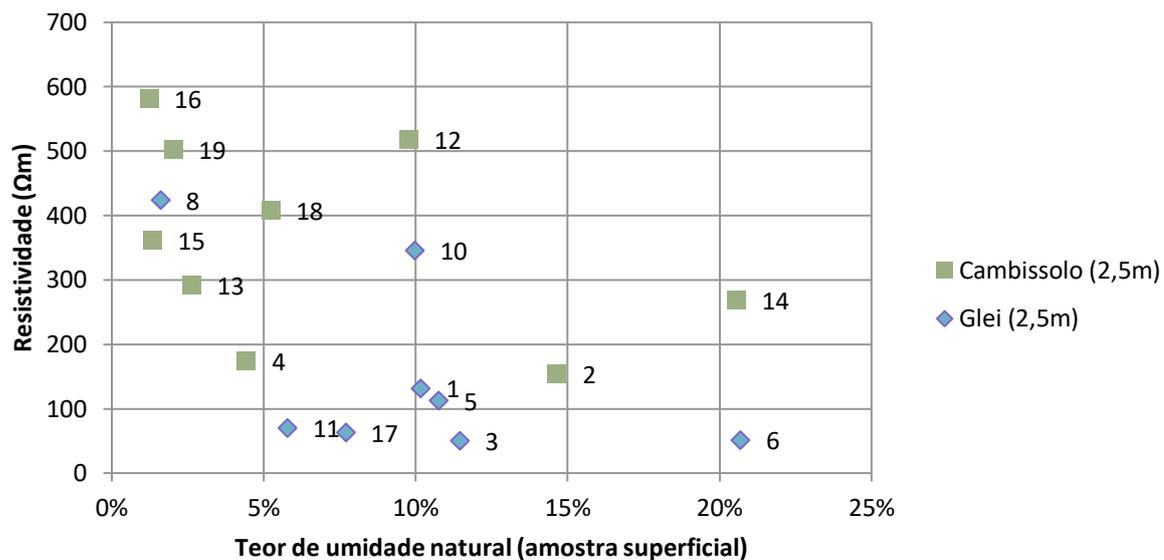
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,0 metros de profundidade e declividade



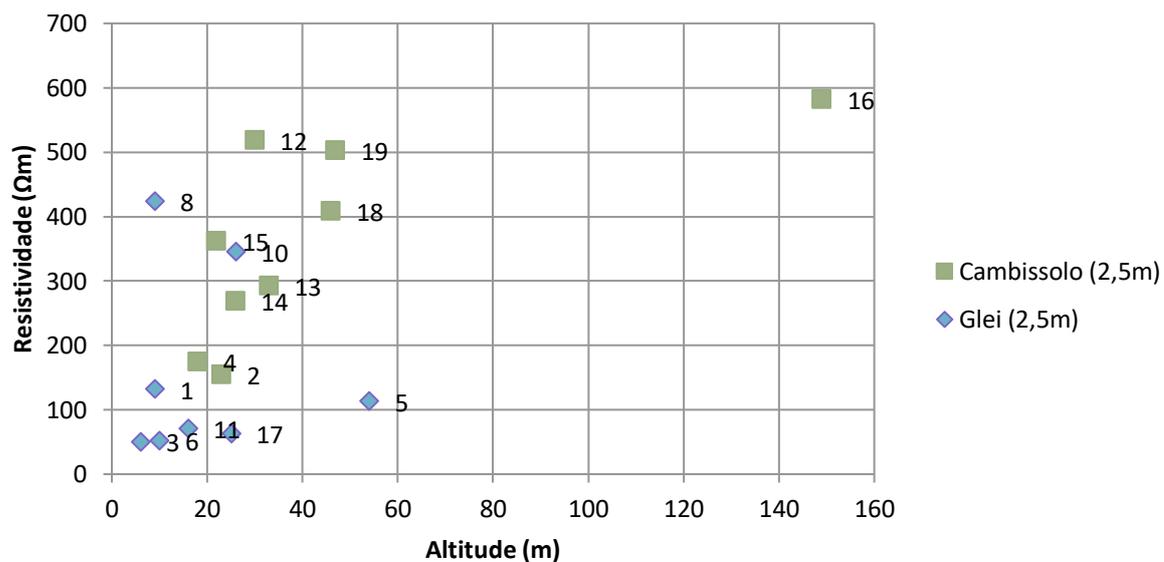
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,5 metros de profundidade e teor de umidade



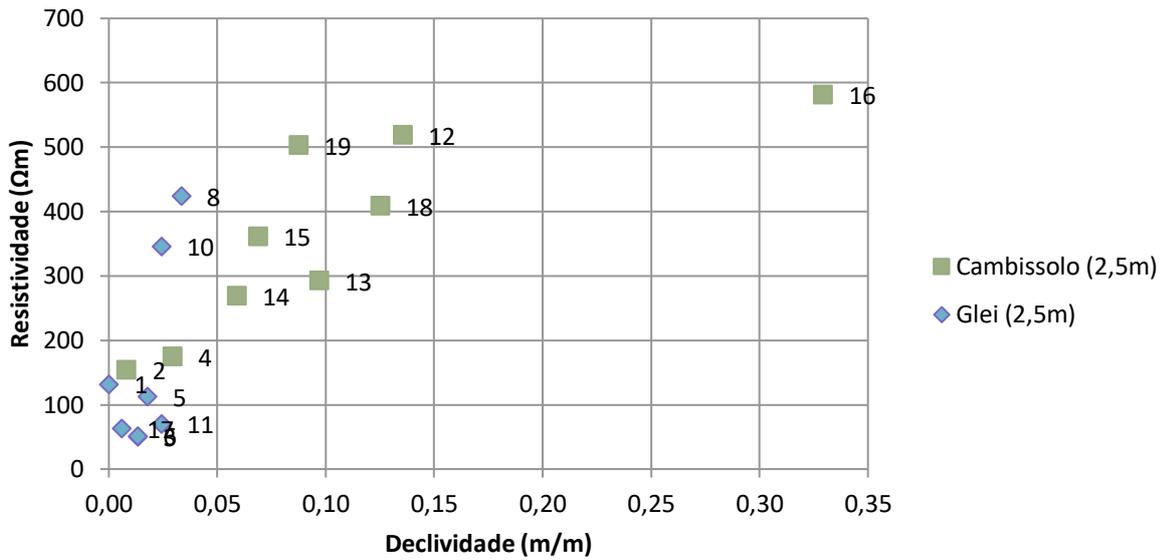
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,5 metros de profundidade e altitude



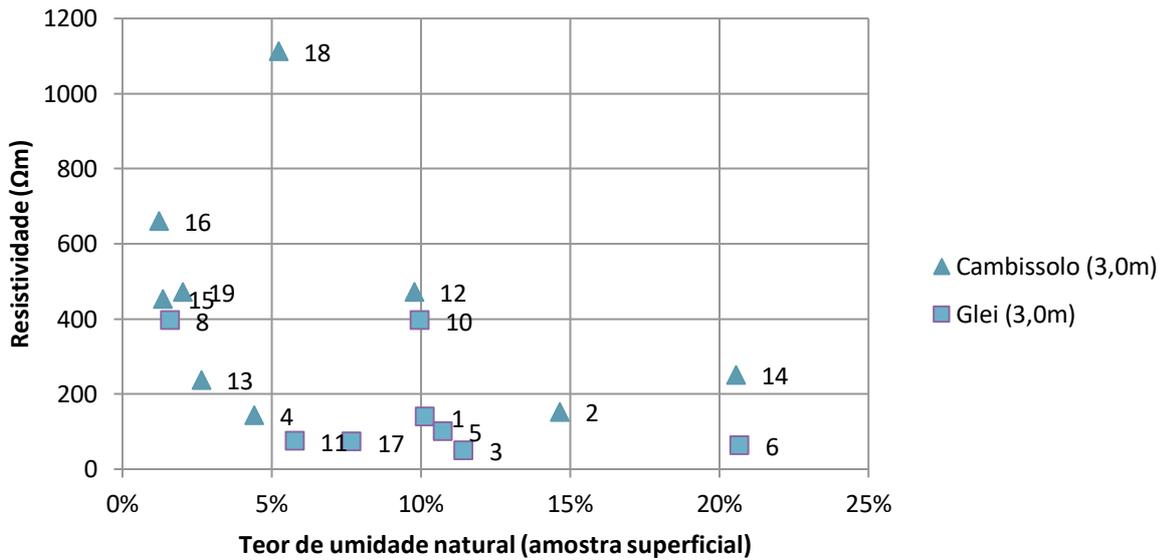
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Gráfico de dispersão de resistividade a 2,5 metros de profundidade e declividade



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Gráfico de dispersão de resistividade a 3,0 metros de profundidade e teor de umidade



Fonte: Elaborado pelo auto

Tabela 18 – R² correlacionando individualmente as variáveis e a resistividade

Variavel	R ² (coeficiente de determinação)					
	Cambissolo			Glei		
	3,0 m	2,5 m	2,0 m	3,0 m	2,5 m	2,0 m
Umidade	0,118	0,197	0,128	0,223	0,286	0,365
Altitude	0,187	0,441	0,283	0,001	0,001	0,007
Declividade	0,288	0,638	0,467	0,402	0,449	0,443

Fonte: Elaborado pelo autor

A fraca correlação individual é esperada, devido ao fato da resistividade ser o resultado de um conjunto de fatores. Assim, fez-se a regressão linear múltipla combinando os fatores (declividade e umidade; declividade e altitude; e declividade, altitude e umidade).

Na regressão linear múltipla, além do valor do R² é preciso verificar o R² ajustado, que verifica o quanto a relação é relevante considerando a quantidade de variáveis na equação, assim como no caso da resistividade a 3,0m de profundidade, o R² aumenta quando faz-se a regressão linear múltipla com todas as variáveis, porém o seu R² ajustado diminui, mostrando que o peso da relação com todas as variáveis começa a ser irrelevante, havendo alguma variável que poderia ser removida da regressão, neste caso o teor de umidade.

Para o Cambissolo (Tabela 19), o valor de R² calculado com a declividade e altitude é relativamente maior que para o calculado com a declividade e o teor de umidade, aumentando muito pouco quando se relaciona todas as três variáveis, e diminuindo o valor de R² ajustado. Assim, tem-se que a relação mais adequada neste caso é com a declividade e a altitude.

Tabela 19 – R² de variáveis combinadas para Cambissolo

Variavel (combinada com declividade)	Cambissolo					
	3,0 m		2,5 m		2,0 m	
	R ²	R ² ajustado	R ²	R ² ajustado	R ²	R ² ajustado
Umidade	0,306	0,075	0,654	0,539	0,475	0,265
Altitude	0,334	0,112	0,707	0,609	0,582	0,415
Umidade e Altitude	0,351	-0,039	0,721	0,553	0,588	0,280

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o Glei (Tabela 15), os valores de R² e R² ajustado, calculados para a relação de declividade e umidade, são maiores que os calculados para a declividade e altitude, e os calculados com as três variáveis. Isto confirma a hipótese

demonstrada pela Tabela 13, que para o Gleí a altitude tem relação quase nula, nesta área de estudo.

Tabela 20 - R² de variáveis combinadas para Gleí

Gleí						
Variável (combinada com declividade)	3,0 m		2,5 m		2,0 m	
	R ²	R ² ajustado	R ²	R ² ajustado	R ²	R ² ajustado
Umidade	0,442	0,219	0,513	0,318	0,554	0,375
Altitude	0,408	0,171	0,456	0,238	0,459	0,243
Umidade e Altitude	0,447	0,033	0,519	0,157	0,569	0,245

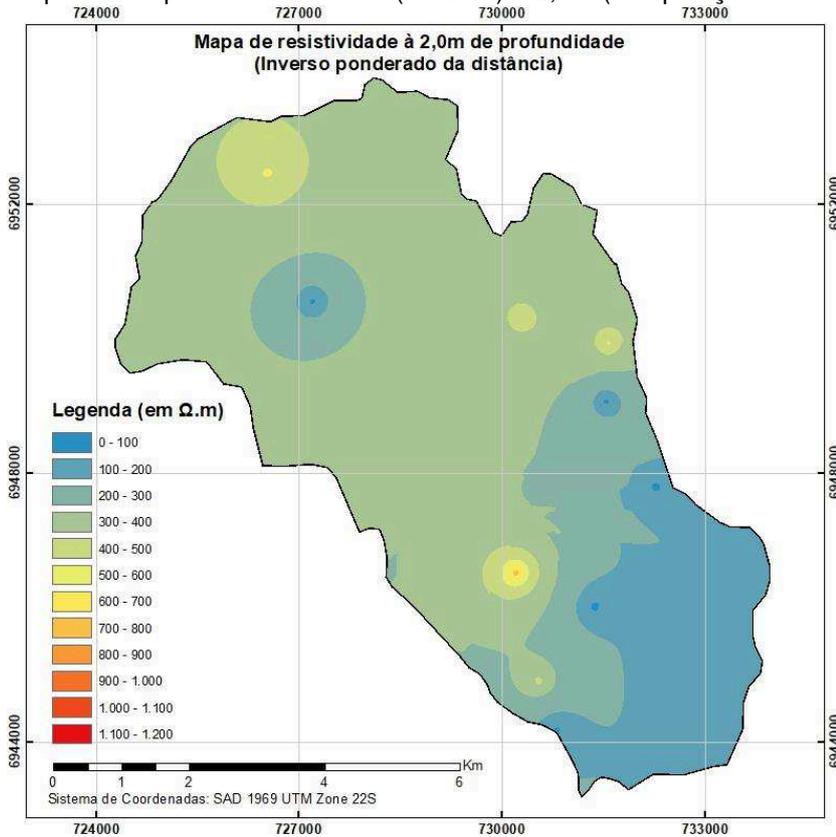
Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 GERAÇÃO DE MAPAS

Para a interpolação dos pontos e geração dos mapas utilizou-se o software ArcGIS, fazendo-se as interpolações através do Inverso ponderado da distância e Krigagem. O software não contém ferramentas que façam uso da regressão linear e da correlação das variáveis, assim, apesar da correlação entre as variáveis demonstrada, não é possível aplicar este conhecimento para a geração dos mapas. O único método encontrado que faz uso da regressão linear é uma combinação da regressão linear com o método da Krigagem, a única forma que encontrou-se de fazer esta interpolação seria com o uso da linguagem “R” em conjunto com a ferramenta “GStat”, o que verificou-se inviável para o trabalho.

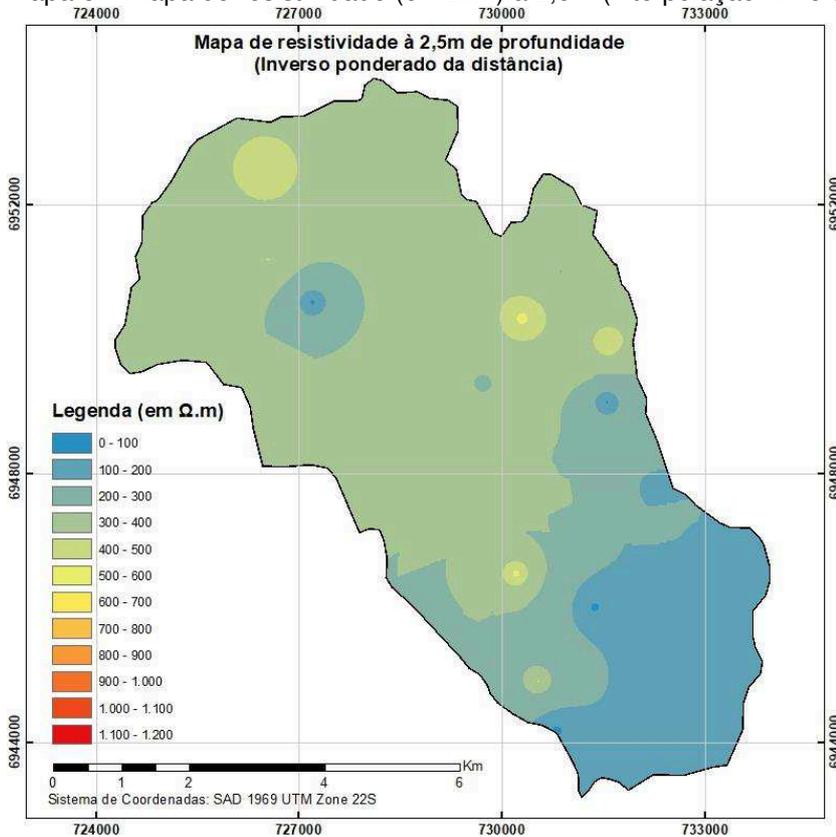
Gerou-se os Mapas 7 a 9 utilizando-se o Inverso ponderado da distância e os Mapas 10 a 12 utilizando-se o método de Krigagem. Os Mapas 7 e 10 foram gerados sem a utilização do ponto 18, pois não foi possível fazer a medição para 2,0m de profundidade neste local.

Mapa 7 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,0m (interpolação: Inverso ponderado da distância)



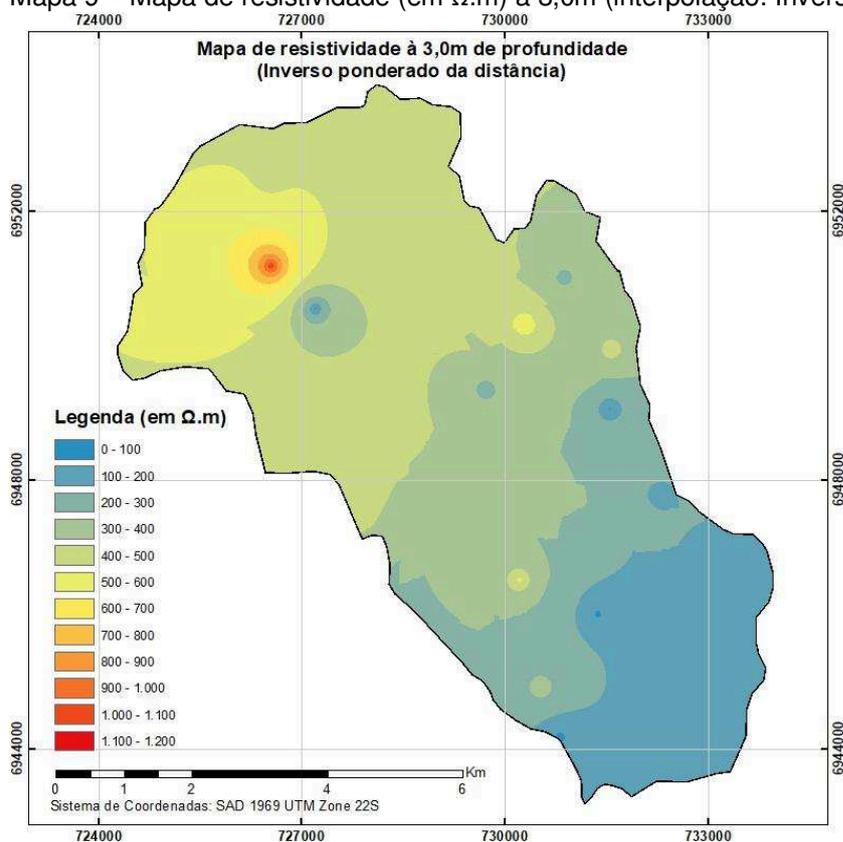
Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 8 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m (interpolação: Inverso ponderado da distância)



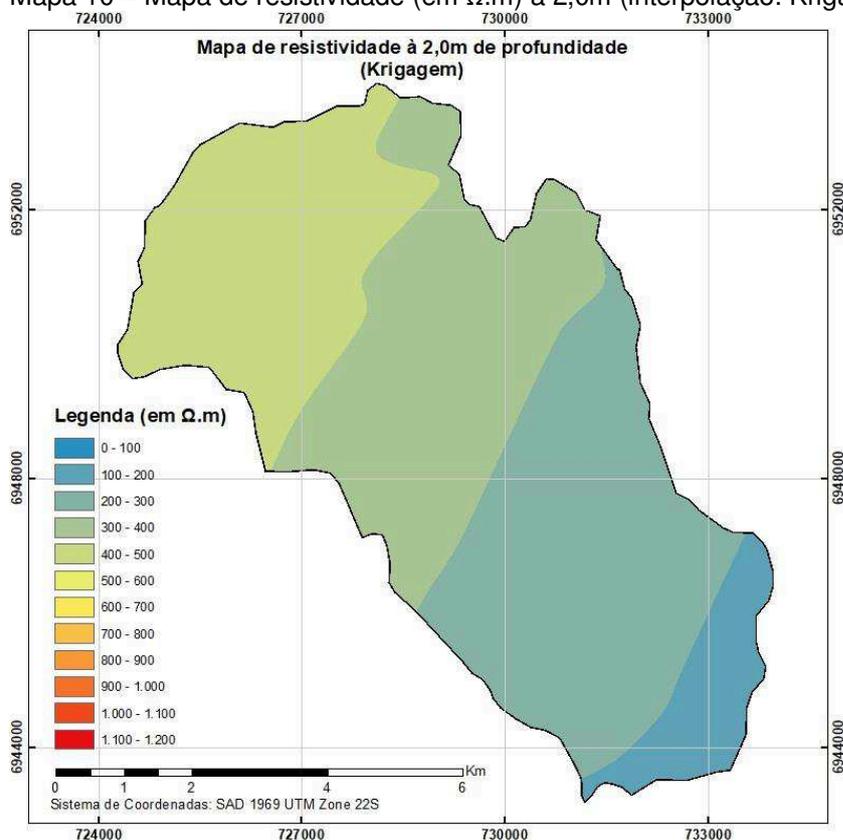
Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 9 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 3,0m (interpolação: Inverso ponderado da distância)



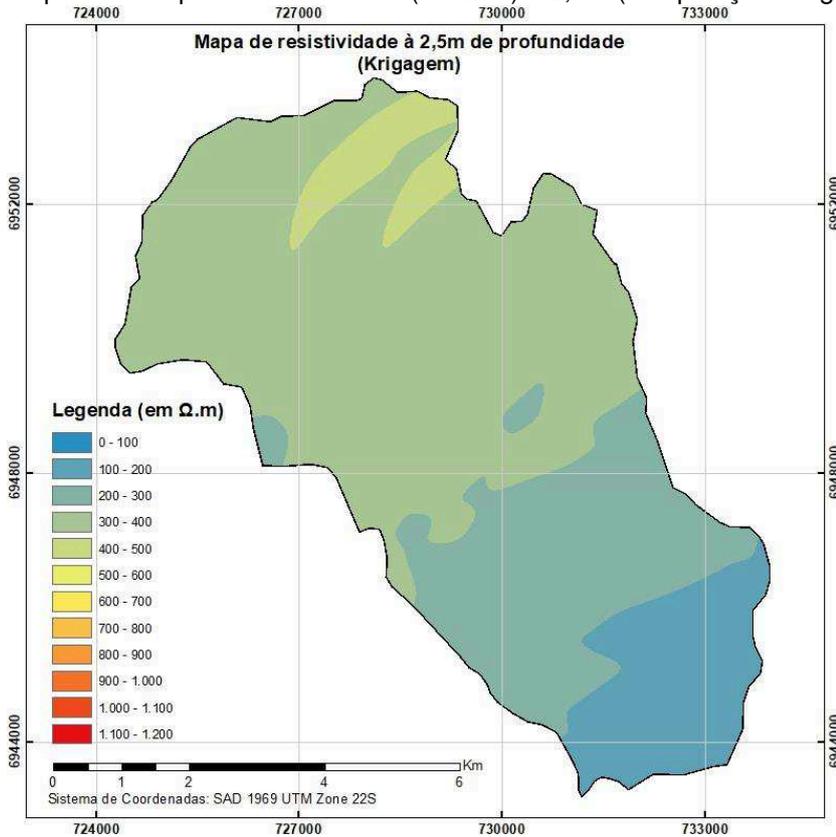
Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 10 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,0m (interpolação: Krigagem)



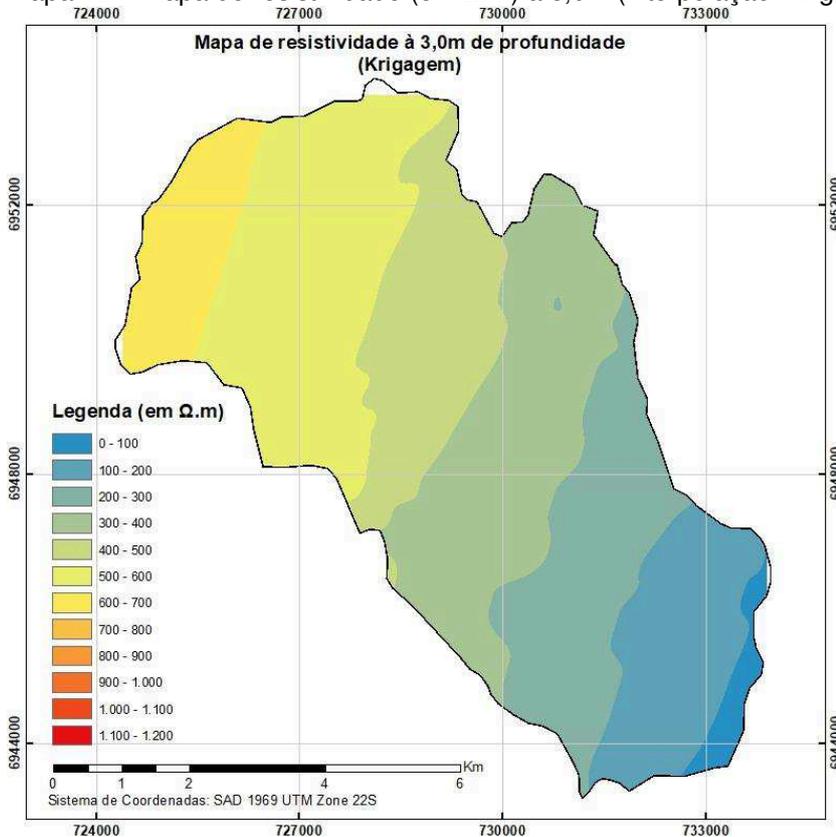
Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 11 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m (interpolação: Krigagem)



Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 12 – Mapa de resistividade (em $\Omega.m$) à 3,0m (interpolação: Krigagem)



Fonte: Elaborado pelo autor

Para comparar os dois métodos fez-se uma validação cruzada: que consiste em retirar um ponto e, então, elabora-se um novo mapa e compara-se o valor calculado no local do ponto retirado, com o valor levantado em campo. Quanto mais próximo estes valores, mais confiável é o método de interpolação no caso específico. Esta avaliação foi feita retirando-se cada ponto de uma vez, e registrando os erros gerados.

As Tabelas 21 a 23 apresentam a validação cruzada dos mapas gerados pelo método do Inverso ponderado da distância. As Tabelas 24 a 26 apresentam a validação cruzada dos mapas gerados pelo método de Krigagem. A Tabela 27 traz um resumo dos resultados obtidos, podendo-se verificar que ambos os métodos de interpolação tentam minimizar o erro médio, assim apresentando um erro médio próximo a zero, porém o desvio padrão é bastante alto, apresentando um erro máximo e mínimo muito amplo.

Tabela 21 – Validação cruzada - Inverso ponderado da distância – resistividade a 2,0m

Ponto retirado	Resistividade medida (Ωm)	Resistividade calculada (Ωm)	Erro
1	126,92	198,09	71,17
2	150,80	194,82	44,02
3	61,58	274,24	212,67
4	180,96	178,77	-2,19
5	118,12	189,87	71,75
6	43,98	266,86	222,88
7	61,58	258,87	197,30
8	452,39	185,23	-267,16
9	791,68	184,46	-607,22
10	251,33	332,18	80,85
11	57,81	342,01	284,21
12	527,79	257,84	-269,94
13	314,16	368,39	54,23
14	301,59	320,65	19,06
15	326,73	322,00	-4,72
16	502,65	314,14	-188,52
17	65,35	378,72	313,38
19	527,79	287,44	-240,35
Erro total			-8,59
Erro médio			-0,48
Desvio Padrão			228,65

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 22 – Validação cruzada - Inverso ponderado da distância – resistividade a 2,5m

Ponto retirado	Resistividade medida (Ωm)	Resistividade calculada (Ωm)	Erro
1	131,95	191,08	59,14
2	153,94	187,83	33,89
3	50,27	258,86	208,60
4	174,36	177,02	2,66
5	113,10	195,05	81,95
6	51,84	247,92	196,09
7	160,22	254,06	93,83
8	424,11	169,26	-254,86
9	565,49	206,39	-359,09
10	345,58	310,51	-35,06
11	70,69	353,23	282,54
12	518,36	271,56	-246,80
13	292,17	381,82	89,66
14	268,61	358,62	90,02
15	361,28	337,02	-24,27
16	581,20	302,94	-278,25
17	62,83	398,77	335,94
18	408,41	310,02	-98,38
19	502,65	330,19	-172,47
Erro total			5,12
Erro médio			0,27
Desvio Padrão			189,80

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 23 – Validação cruzada - Inverso ponderado da distância – resistividade a 3,0m

Ponto retirado	Resistividade medida (Ωm)	Resistividade calculada (Ωm)	Erro
1	137,60	184,63	47,02
2	152,68	183,51	30,83
3	49,01	251,91	202,90
4	143,26	178,12	34,87
5	99,90	195,42	95,52
6	62,20	244,45	182,25
7	177,19	255,33	78,14
8	395,84	170,28	-225,56
9	546,64	218,49	-328,15
10	395,84	314,68	-81,16
11	73,51	355,64	282,12
12	471,24	282,62	-188,62
13	237,50	437,72	200,22
14	250,70	418,78	168,09
15	452,39	411,12	-41,27
16	659,73	327,54	-332,19
17	71,63	602,03	530,40
18	1112,12	315,49	-796,63
19	471,24	532,31	61,07
Erro total			-80,15
Erro médio			-4,22
Desvio Padrão			278,56

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 24 – Validação cruzada - Krigagem – resistividade a 2,0m

Ponto retirado	Resistividade medida (Ωm)	Resistividade calculada (Ωm)	Erro
1	126,92	211,62	84,70
2	150,80	172,13	21,33
3	61,58	288,71	227,14
4	180,96	182,09	1,13
5	118,12	219,86	101,74
6	43,98	244,44	200,46
7	61,58	244,74	183,17
8	452,39	197,55	-254,83
9	791,68	200,76	-590,92
10	251,33	277,57	26,25
11	57,81	293,83	236,02
12	527,79	214,14	-313,65
13	314,16	317,32	3,16
14	301,59	320,61	19,01
15	326,73	372,07	45,35
16	502,65	289,68	-212,98
17	65,35	527,56	462,21
19	527,79	399,75	-128,04
Erro total			111,26
Erro médio			6,18
Desvio Padrão			234,52

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 – Validação cruzada - Krigagem – resistividade a 2,5m

Ponto retirado	Resistividade medida (Ωm)	Resistividade calculada (Ωm)	Erro
1	131,95	196,48	64,53
2	153,94	151,00	-2,94
3	50,27	246,57	196,31
4	174,36	176,73	2,37
5	113,10	230,25	117,16
6	51,84	223,05	171,22
7	160,22	283,61	123,39
8	424,11	167,24	-256,88
9	565,49	218,20	-347,29
10	345,58	285,19	-60,39
11	70,69	339,23	268,54
12	518,36	286,11	-232,25
13	292,17	343,44	51,27
14	268,61	329,96	61,35
15	361,28	356,60	-4,69
16	581,20	287,37	-293,82
17	62,83	453,68	390,85
18	408,41	357,17	-51,24
19	502,65	307,77	-194,89
Erro total			2,62
Erro médio			0,14
Desvio Padrão			192,41

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 26 – Validação cruzada - Krigagem – resistividade a 3,0m

Ponto retirado	Resistividade medida (Ωm)	Resistividade calculada (Ωm)	Erro
1	137,60	162,49	24,88
2	152,68	103,27	-49,41
3	49,01	298,58	249,57
4	143,26	103,71	-39,54
5	99,90	157,81	57,90
6	62,20	232,50	170,29
7	177,19	233,97	56,78
8	395,84	238,42	-157,42
9	546,64	280,15	-266,49
10	395,84	309,80	-86,04
11	73,51	314,17	240,66
12	471,24	267,60	-203,64
13	237,50	338,90	101,40
14	250,70	410,44	159,74
15	452,39	508,06	55,67
16	659,73	306,98	-352,76
17	71,63	656,85	585,23
18	1112,12	390,51	-721,61
19	471,24	642,33	171,09
Erro total			-3,70
Erro médio			-0,19
Desvio Padrão			267,63

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 27 – Comparação da validação cruzada

Método	Profundidade (m)	Erro médio	Desvio Padrão	Erro máximo	Erro mínimo
Inverso ponderado da distância	2	-0,48	228,65	313,38	-607,22
	2,5	0,27	189,80	335,94	-359,09
	3	-4,22	278,56	530,40	-796,63
Krigagem	2	6,18	234,52	462,21	-590,92
	2,5	0,14	192,41	390,85	-347,29
	3	-0,19	267,63	585,23	-721,61

Fonte: Elaborado pelo autor

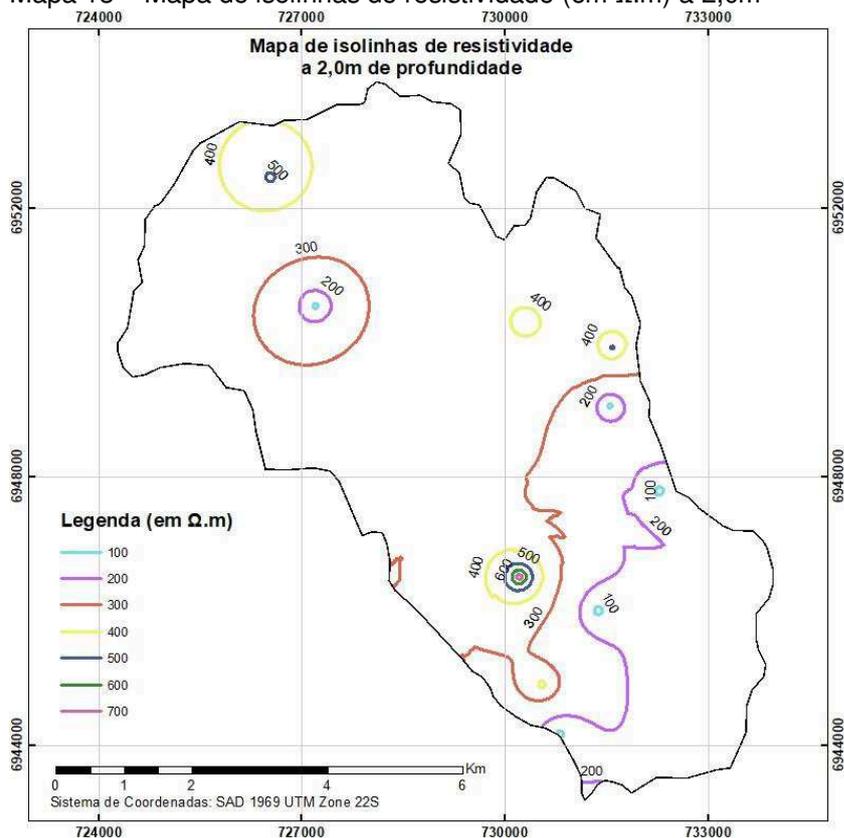
Comparando-se os métodos de interpolação pela validação cruzada foi possível perceber que não há um candidato ótimo para a escolha do método de interpolação. Verifica-se um menor erro médio e desvio padrão para o método do inverso ponderado da distância, mas a margem é muito pequena para uma escolha objetiva.

Fez-se alguns experimentos, por meio do software “ARCGIS”, verificando outros métodos de interpolação, ou variações dos métodos utilizados, ajustando algumas variáveis. Porém, todos os experimentos resultaram valores menos adequados que os apresentados neste trabalho.

Os mapas gerados pelo inverso ponderado da distância geram valores iguais aos medidos em campo, devido à própria natureza do método, onde a

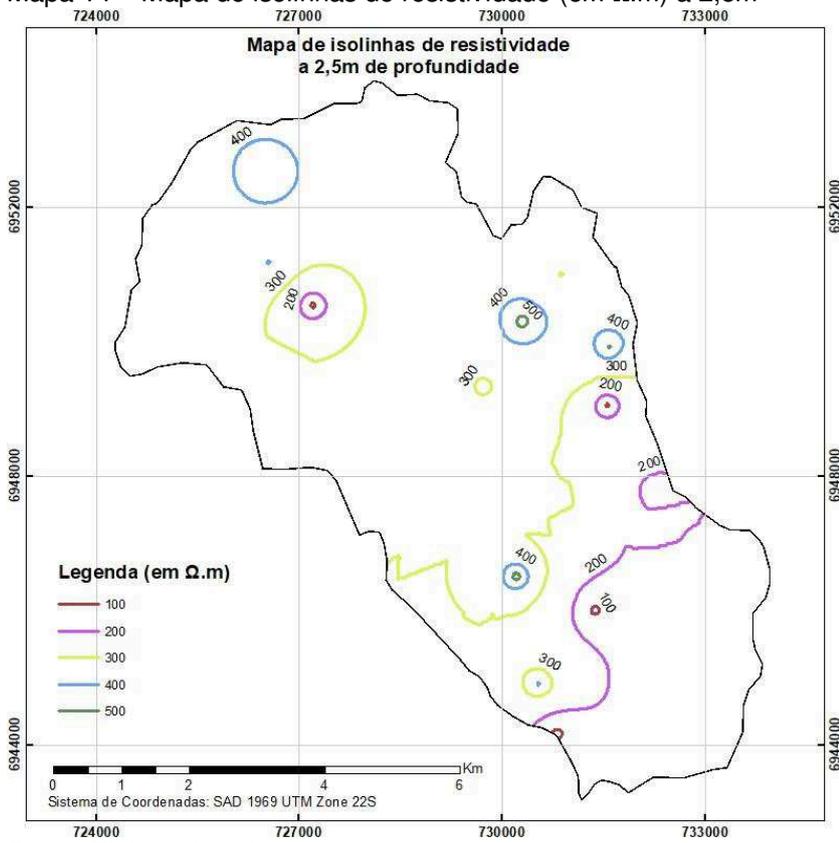
Krigagem traz valores bem diferentes dos obtidos em campo. Além disto, os métodos de Krigagem são menos recomendados para uma pequena quantidade de pontos amostrados e valores discrepantes. Assim, decidiu-se por utilizar os mapas gerados pelo método do inverso ponderado da distância, gerando-se os mapas de isolinhas, apresentados nos Mapas 13 a 15.

Mapa 13 – Mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,0m



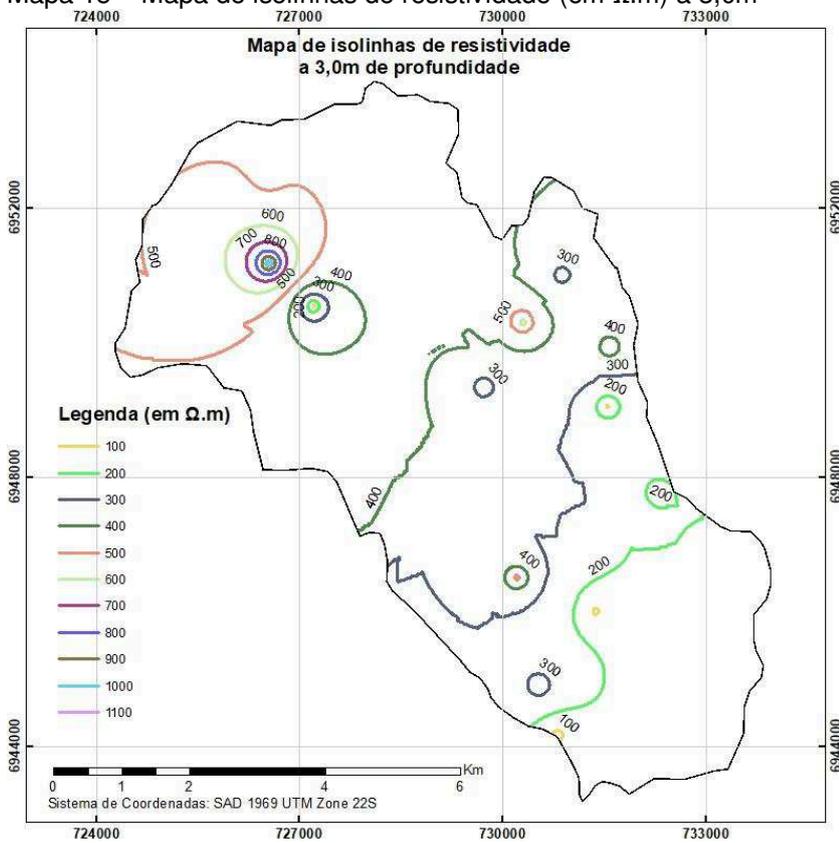
Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 14 – Mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m



Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa 15 – Mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 3,0m



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 SUGESTÃO DE USO DO MAPA DE ISOLINHAS

Tendo-se os mapas de isolinhas representando os valores de resistividade, pode-se calcular a resistência do subsistema de aterramento pelos métodos apresentados no Capítulo 2.3.

Para a resistividade utiliza-se a maior valor da isolinha da região ao que o ponto pertence.

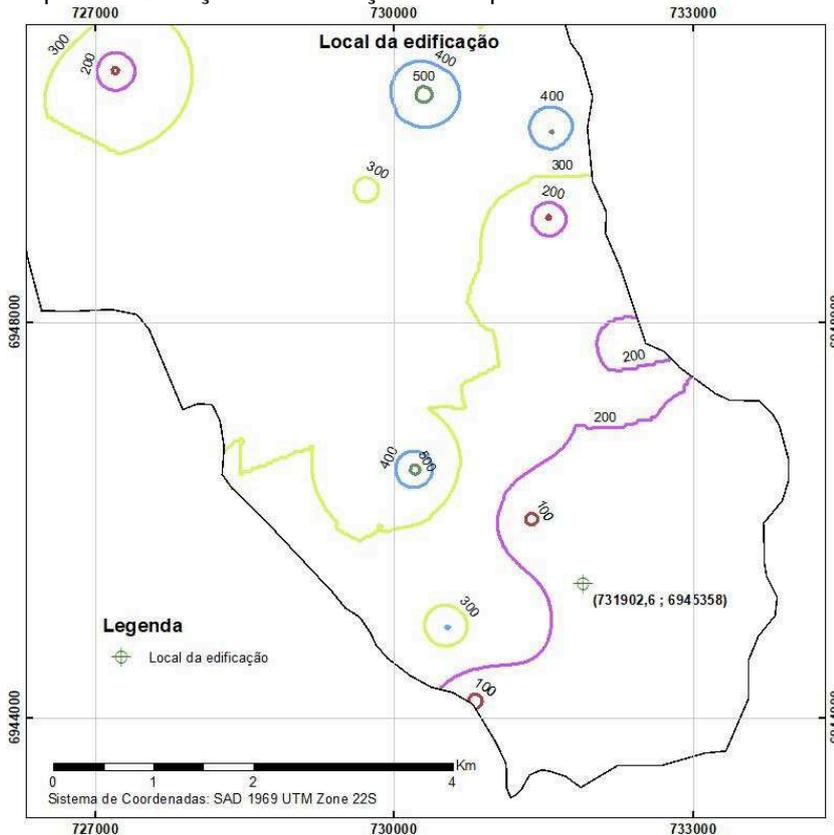
É importante observar, que o auxílio do mapa de resistividade não substitui a recomendação da NBR 7117:2012 de um estudo de resistividade no terreno, onde se deseja fazer o SPDA.

5.4.1 Exemplo de cálculo

Para este exemplo, será considerada uma edificação a ser protegida, onde será adotado o subsistema de aterramento em forma de hastes alinhadas interligadas, enterradas a 2,4m de profundidade e com diâmetro de 5/8" (15mm). Pretende-se chegar a uma resistência máxima de 10 Ω , IN 010 do CBM/SC.

Precisa-se calcular o número mínimo de hastes a se utilizar no sistema que obedeçam às características adotadas.

Utilizando-se o Mapa 16, loca-se o local de interesse e verifica-se os valores das isolinhas que circundam o local. No exemplo adotado, o ponto se encontra entre as isolinhas de 100 Ω .m e 200 Ω .m, assim adota-se o valor de 200 Ω .m como resistividade.

Mapa 16 – Locação da edificação no mapa de isolinhas de resistividade (em $\Omega.m$) à 2,5m

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela configuração escolhida do subsistema de resistividade, precisa-se calcular a resistência de uma haste. Utilizando a Equação (1):

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \left\{ \ln \left(\frac{4 \cdot L}{r} \right) - 1 \right\}$$

Onde,
 $\rho = 200 \Omega.m$;
 $L = 2,4m$; e
 $r = 0,0075m$.

Assim,

$$R = \frac{200}{2\pi \cdot 2,4} \left\{ \ln \left(\frac{4 \cdot 2,4}{0,0075} \right) - 1 \right\}$$

$$R = 81,63 \Omega$$

Tem-se, então, que a resistência, caso se utilize apenas uma haste, seria igual a $81,63 \Omega$, o que é maior que o valor máximo de 10Ω que se pretende chegar. Assim, é preciso, aumentar o número de hastes. Utiliza-se a Equação (7) para determinar o fator de interferência “k” máximo.

$$R = k \cdot R_1$$

Onde,
 $R = 10 \Omega$;
 $R_1 = 81,63 \Omega$;

Assim,

$$k = \frac{10}{81,63}$$

$$k = 0,123$$

Finalmente, pela Tabela 9, pode-se adotar 12 hastes com espaçamento de 3,0m entre elas ($k=0,125$), ou 11 hastes com espaçamento de 4,0m ($k=0,124$), ou ainda 10 hastes com espaçamento de 5,0m ($k=0,128$).

6 CONCLUSÕES

Conforme demonstrou-se, a relação entre os dados utilizados no presente trabalho, como inclinação, altitude, umidade da amostra superficial e a unidade pedológica, apesar de ser uma correlação de fraca a média, ainda é relevante, podendo ser utilizado para estudos futuros em uma melhor análise da área, em especial se forem utilizados dados mais precisos, como a umidade do solo na profundidade adequada com a medição de resistividade.

Além disso, ressalta-se que os métodos de interpolação devem ser utilizados com zelo, pois nem todas as formas de interpolação, utilizando-se geoestatística, trazem resultados adequados, dependendo da área de estudo, dos pontos especializados e de seus valores. No presente trabalho, a interpolação por inverso ponderado da distância mostrou-se a mais adequada, porém, ainda com muito erro. Seria necessário aumentar a densidade de pontos, aumentando, assim, a resolução espacial.

Apesar de a resolução espacial escolhida ser adequada, viu-se que os valores medidos têm uma discrepância alta, prejudicando ainda mais o método de interpolação por Krigagem. Seria recomendado fazer mais levantamentos, em pequenas áreas específicas, da área de interesse, sempre que encontrar-se valores vizinhos discrepantes, para minimizar o erro durante a interpolação.

Seria recomendada a adoção de ferramentas de interpolação, que façam uso de regressões múltiplas, quando se tem outros dados que podem ajudar a explicar o comportamento dos valores medidos na região. Isto pode ajudar a explicar comportamentos que não são explicados apenas por geoestatística e assim apresentar valores mais próximos do real, no mapa resultante.

Apesar das dificuldades apresentadas, este trabalho concluiu seu objetivo de gerar um mapa de isolinhas capaz de orientar o desenvolvimento de projetos de aterramento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Ainda que o mais adequado fosse fazer este estudo para cada terreno onde se vá construir, este não é o padrão de mercado. Existem boas definições de como um sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve se comportar, mas faltam dados na fase de projetos para adaptar de forma mais eficiente o projeto ao local da edificação. Assim acaba-se optando por projetos mais genéricos, que podem causar

riscos que apenas são revelados após a construção. Com um mapa de resistividade, auxiliando o profissional, é possível melhorar a eficiência do projeto, evitando-se riscos, e planejando ainda em fase de projeto qual o melhor método de proteção a se adotar no local da construção.

O mapa gerado pode ser utilizado apenas como um orientador ao se dimensionar o subsistema de aterramento, não substituindo as recomendações da NBR 5419:2015, ou outras normas estaduais dos órgãos responsáveis. Sendo, também, melhorado com tempo, acrescentando-se mais informações da resistividade na área de estudo.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aumentar a densidade de pontos estudados para um melhor estudo da correlação entre as características físicas do solo e a resistividade do solo;
- Desenvolver e estudar métodos de interpolação que utilizem a regressão linear em conjunto com geoestatística;
- Ampliar a área de estudo.
- Estudar o teor de umidade na profundidade medida.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749**: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, 2009.

Bourscheidt, Vandoir. **Estudo da relação entre relâmpagos, relevo, Temperatura de superfície e tipos de solo no Rio grande do sul**. Dissertação (Mestrado). INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Pós-Graduação em Geofísica Espacial. São José dos Campos, 2008.

COELHO, Nuno Filipe Barbosa. **Eléctrodos de Terra**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Porto, Portugal, 2011.

COELHO, vilson luiz. **Influência das descargas atmosféricas no desempenho de sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis, 2005.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA. **IN 010**: Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas. Florianópolis, 2014. Disponível em: <http://www.cbm.sc.gov.br/dat/images/arquivo_pdf/IN/IN_29_06_2014/IN_10.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

DAVISON DIAS, R. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico (IG)**. Vol. Especial. São Paulo, 1995. p. 51-55. Disponível em: <<http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8845>>. Acesso em: 10 out. 2017.

ELAT - GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (Brasil). INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **ELAT divulga dados de mortes por raios dos últimos 15 anos no Brasil e informa previsão de raios para o verão de 2017**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/release.php?id=70>>. Acesso em: 12 set. 2017.

ELAT - GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (Brasil). INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Infográfico Vítimas de Raio**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/vitimas.de.raios.-.infografico.php>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

ELAT - GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (Brasil). INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Morre-se mais por raio na América Latina do que em países desenvolvidos**. Disponível em: < <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/release.php?id=41> >. Acesso em: 12 set. 2017.

ELAT - GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (Brasil). INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Nova rede de dados revela aumento da média anual de raios no Brasil e densidades de descargas com maior precisão para estados e municípios**. Disponível em: < <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/release.php?id=72> >. Acesso em: 12 set. 2017.

EMBRAPA - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/classificacao-de-solos> >. Acesso em: 16 out. 2017.

EMÍLIO, Rodolfo Arend. **Estudo de aterramento em baixas frequências usando a formulação eletrocinética associada ao método de elementos finitos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis, 2009.

HIGGS ,P. J. **An investigation of earthing resistances**. Journal of the Institution of Electrical Engineers. Vol. 68. 1930.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge M. **Aterramento Elétrico**. 3ª. ed. Porto Alegre: Sagra-dc luzzatto, 1995.

LAMGEO. **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana do município de São José**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Lab. Geomatématica, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 02, 2000.

PINHEIRO, Tiago Figueira Leão. **Sistemas de aterramento em baixa tensão**. Monografia (Graduação). Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de graduação em Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, A. B. **Sistemas de informações georreferenciadas: conceitos e fundamentos**. UNICAMP, São Paulo, 1999.

SOZO, iverson. **Desenvolvimento de ferramenta didática para cálculo de malha de aterramento**. Monografia (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, 2014.

SUETA, Hélio; MODENA, Jobson. O Setor Elétrico. Procedimentos para medição da resistividade do solo, v. XII, XII. Disponível em: < <https://www.osetoelettrico.com.br/category/fasciculos/anteriores/aterramentos-eletricos/> >. Acesso em: 19 outubro 2017.

THIESEN, Stephanie. **Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: um estudo de caso em Blumenau/SC**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2016.

VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos Elétricos**. 1ª. ed. São Paulo: Artliber, 2005.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1987.

ANEXO A – Certificado de calibração

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO	11402017	PÁGINA	1 de 2
--------	----------	--------	--------

CALIBRAÇÃO REALIZADA EM	CERTIFICADO EMITIDO EM	VALIDADE RECOMENDADA
22/08/2017	22/08/2017	22/08/2018

CLIENTE

Empresa - Triches Engenharia e Consultoria Ltda.
Endereço - Rua Jerônimo Coelho, 280 Sala 905 - Centro - Florianópolis - SC

OBJETO DO ENSAIO

Equipamento - Terrômetro digital Impac Modelo ITRD - 400 - **Sr.044085**
Identificação - Não fornecida
Data do recebimento - Equipamento novo

CARACTERÍSTICAS DO OBJETO

- * Faixa de Medição de Resistência - (2Ω ... $20K\Omega$)
- * Precisão: Faixa de $2\Omega \pm 3\%$ leitura $\pm 0,05$ dígitos) demais: $\pm 3\%$ leitura ± 5 dígitos
- * Sistema de Indicação - Display de Cristal Líquido 192x64 monocromático
- * Alimentação - 8 Pilhas de 1,5V

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

TEMP. AMBIENTE	17°C	UMIDADE RELATIVA	69%
----------------	------	------------------	-----

DESCRIÇÃO DO MÉTODO

- * A incerteza dos resultados obtidos foi determinada conforme procedimento interno IT 09001, Revisão 00 o qual foi baseado na ISO-TAG 4 - WG-3 de 1993 para um Nível de Confiança de $\cong 95\%$ e $K \cong 2$
- * Esta Calibração foi realizada conforme Procedimento MEC-09-001

EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

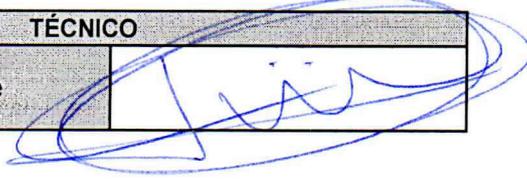
- * Década de resistência Modelo TETTEX AG ZURICH
- Multímetro Hewlett Packard model 34401A serial number US36032014, rastreado a Rede Brasileira de Calibração sob etiqueta Inmetro RBC-17-0336.Validade 17/07/2018

RASTREABILIDADE

- Multímetro Hewlett Packard model 34401A serial number US36032014, rastreado a Rede Brasileira de Calibração sob etiqueta Inmetro RBC-17-0336.Validade 17/07/2018

OBSERVAÇÕES

- * Nosso Laboratório opera de acordo com o previsto na norma NBR ISO 17025
- * Este Certificado é válido exclusivamente para o objeto ensaiado. A reprodução Parcial ou Total só será permitida mediante prévia autorização da Impac Comercial e Tecnologia.

GERENTE TÉCNICO		TÉCNICO	
Laerte Binhardi Crea - 71404		luis josé	

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

NÚMERO

11402017

PÁGINA

2 de 2

RESISTÊNCIA					
ESCALA	PADRÃO	MEDIDO	DESVIO	DESVIO PADRÃO	INCERTEZA
(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)		\pm (Ω)
2	0,580	0,52	-0,060	0,005	0,026
	1,080	1,03	-0,050	0,005	0,042
	1,580	1,54	-0,040	0,005	0,028
	1,980	2,05	0,070	0,009	0,030
20	2,080	2,0	-0,080	0,007	0,026
	8,080	8,0	-0,08	0,008	0,042
	12,080	12,1	0,02	0,004	0,028
	18,080	18,1	0,02	0,004	0,029
200	20,080	20	-0,1	0,084	0,112
	80,080	80	-0,1	0,084	0,128
	120,080	120	-0,1	0,055	0,091
	180,080	180	-0,1	0,055	0,096
(K Ω)	(K Ω)	(K Ω)	(K Ω)		\pm K(Ω)
2	0,200	0,20	0,000	0,001	0,001
	0,800	0,80	0,000	0,001	0,001
	1,200	1,20	0,000	0,001	0,001
	1,800	1,80	0,000	0,001	0,001
20	2,000	2,0	0,000	0,001	0,001
	8,000	8,0	0,000	0,001	0,001
	12,000	12,0	0,000	0,001	0,001
	18,000	18,1	0,100	0,001	0,001

GERENTE TÉCNICO		TÉCNICO	
Laerte Binhardi Crea - 71404		luis josé	