

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULO ROBERTO DA SILVA JÚNIOR

ANÁLISE TEMPORAL DA BIODEGRADAÇÃO EM SOLOS
CONTAMINADOS POR MEIO DA ELETORRESISTIVIDADE

BELO HORIZONTE

2020

ANÁLISE TEMPORAL DA BIODEGRADAÇÃO EM SOLOS
CONTAMINADOS POR MEIO DA ELETRORRESISTIVIDADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Hersília de Andrade e Santos

Coorientador: Prof. Dr. Remke Van Dam

BELO HORIZONTE

2020

S586a Silva Júnior, Paulo Roberto da
Análise temporal da biodegradação em solos contaminados por meio da eletrorresistividade / Paulo Roberto da Silva Júnior. – 2020.
91 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.

Orientadora: Hersília de Andrade e Santos.

Coorientador: Remke Van Dam.

Bibliografia: f. 88.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Diesel – Teses. 2. Prospecção – Métodos geofísicos – Teses.
3. Latossolos – Teses. 4. Solos – Testes – Teses. I. Santos, Hersília de Andrade. II. Van Dam, Remke. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil.
IV. Título.

CDD 624.15136

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço imensamente a minha família pela compreensão e carinho em todos os momentos da minha vida. Em especial, aos meus pais, Paulo Roberto e Maria Tereza, por todos os incentivos, ensinamentos e carinho que sempre me proporcionam. À minha irmã, Fernanda e seu marido, Lucas, pelo apoio e cumplicidade.

Agradeço também a minha orientadora Hersília de Andrade e Santos, pela paciência, disponibilidade, amizade e por todo o conhecimento transmitido ao longo desses 2 anos de trabalho. E ao meu coorientador, Remke Van Dam, por todos os ensinamentos e pela amizade.

Agradeço, aos professores Rogério, Lineker e Luis Bacellar, pela disponibilidade e pelos ensinamentos que foram fundamentais para a construção deste documento. Ao Dayvison, por sempre auxiliar e esclarecer todas as minhas dúvidas relativas as documentações do mestrado. Aos técnicos de laboratório do CEFET, em especial ao Ivan, por disponibilizar o laboratório de solos e me ajudar na realização dos ensaios. Ao Marcos Fernando, que nesse momento tão difícil de pandemia, autorizou o meu acesso ao Campus 2.

Aos amigos que fiz no mestrado: Harley, Tathiana, Camila, Rodrigo, Bruno, Vitor, Fernanda, Ablail, Guilherme, Isabella. Ludmila e Verônica, muito obrigado pelos conselhos e pela companhia.

Agradeço também ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pela bolsa de mestrado. A Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro por meio do projeto “TEC-RDP-00186-10”. À CAPES e ao CNPQ pelo financiamento dos recursos necessários ao desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

O solo é o mais antigo e também o mais utilizado material da construção civil. O Brasil, assim como outros países que passaram por um rápido processo de desenvolvimento de urbanização, possui desafios referentes a manutenção da qualidade dos seus solos. Diferentes poluentes contaminam o solo, destacando-se os hidrocarbonetos de petróleo. Os métodos geofísicos são uma alternativa para a detecção de plumas de contaminação, em especial a eletrorresistividade. O presente trabalho teve como objetivo, avaliar a resistividade do solo em função da variação e interação de quatro fatores: concentração do contaminante, granulometria, teor de umidade e do tempo de permanência do contaminante no solo. Para isso, experimentos controlados em laboratório, utilizando a eletrorresistividade, foram realizados em um aparato experimental cilíndrico de PVC e solos em diferentes combinações dos fatores: i) teor de água (30%, 40% e 50%); ii) diferentes granulometrias (<2mm a 0,06mm e <0,06mm) e concentrações de óleo diesel (0%, 5% e 10%), foram armazenados em recipientes hermeticamente fechados por sete meses. Dois tipos de análise de variância foram utilizados: a fatorial e a pareada. Resultados indicaram que os quatro fatores e a interação entre eles explicam significativamente o processo de biodegradação, medido indiretamente pela resistividade. Esse processo não estabiliza com sete meses e sua velocidade da atuação depende da configuração dos fatores granulometria, teor de umidade e concentração do contaminante. Na maior parte dos cenários com diesel, ocorreu uma queda da resistividade nos segundo, terceiro e quarto mês, o que pode indicar o início da biodegradação do óleo diesel. Finalmente, o método desenvolvido na presente pesquisa, para avaliação da biodegradação por meio da resistividade do solo, provou-se ser eficiente na detecção de padrões de solo contaminado e pode ser empregado futuramente em estudos de contaminação de diferentes solos por diferentes contaminantes.

Palavras-chave: Óleo diesel, método geofísico, latossolo, análise experimental.

ABSTRACT

The soil is the oldest and also the most used material in civil construction. Brazil and the other countries, that had a rapid process of urbanization development, face challenges about the "soils health". Different pollutants contaminate the soil, especially oil hydrocarbons. Geophysical methods are an alternative for the detection of contamination plumes, especially electrical resistivity. Thus, we aimed to evaluate the relation between the soil resistivity and four factors: contaminant concentration, soil granulometry, water concentration in soil and the time of contaminant presence in the soil. Controlled laboratory experiments were performed in a cylindrical experimental apparatus of PVC and soils in different combinations of factors: i) water concentration (30%, 40% and 50%); ii) different granulometries (<2mm to 0.06mm and <0.06mm) and diesel oil concentrations (0%, 5% and 10%), were stored in hermetically sealed containers for seven months. Two types of variance analysis were used: factorial and paired. Results indicated that the four factors and the interaction between them significantly explain the biodegradation process, indirectly measured by resistivity. This process does not stabilize at seven months and its speed depends on the configuration of the granulometry factors, water and diesel concentration. In most of the scenarios with diesel, there was a drop in the resistivity in the second, third and fourth months, which may indicate the biodegradation beginning of diesel oil. Finally, the method developed in the present research, to evaluate the biodegradation through the soil resistivity, proved to be efficient in the detection of contaminated soil patterns and can be used in future studies of different soils contamination by different contaminants.

Keywords: Diesel oil, geophysical method, latossolo, experimental analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interação contínua entre solo, água e ar e a propagação de poluentes ...	18
Figura 2 - Produção de derivados do petróleo no Brasil em 2017.....	21
Figura 3 - Contaminação do solo (a) Fases de contaminação dos hidrocarbonetos no solo (b) Localização das fases de contaminação dos hidrocarbonetos no solo após o vazamento.....	23
Figura 4 - Mudança das propriedades geofísicas provocadas pela biodegradação dos hidrocarbonetos.....	25
Figura 5 – Comportamento do potencial elétrico com a aplicação da polarização induzida.....	28
Figura 6 – Enquadramento metodológico	42
Figura 7 – Detalhamentos das etapas do método de procedimentos	43
Figura 8 – Amostras de solo separado em duas granulometrias: a) Granulometria 1 b) Granulometria 2	45
Figura 9 – PHmetro: a) Aparelho <i>IdeePen</i> b) Realização da medição	48
Figura 10 – Medição do teor de umidade: a) Estufa b) Medidor ECOWITT	48
Figura 11 – Bombona utilizada no armazenamento do solo contaminado	49
Figura 12 – Aparato experimental a) Escala e componentes do aparato experimental b) Imagem do aparato experimental c) Eletrodo de corrente no interior do cap.....	50
Figura 13– Compactação do solo a) Soquete b) Suporte para a compactação	51
Figura 14- Equipamento utilizado para as medições de eletrorresistividade.....	52
Figura 15- Medição da resistividade a) aparato experimental b) <i>4 point light 10 W</i> ..	52
Figura 16 – Curva granulométrica	55
Figura 17 – Boxplots da variação da resistividade influenciada pela granulometria, teor de umidade e concentração do contaminante: a) Mês 1, b) Mês 4, c) Mês 5 e d) Mês 7	58
Figura 18– Teste de normalidade dos resíduos das ANOVA realizadas para cada mês: a) mês 1; b) mês 2; c) mês 3; d) mês 4; e) mês 5; f) mês 6 e g) mês 7.	66
Figura 19– Aleatoriedade dos resíduos das ANOVA realizadas para cada mês: a) mês 1; b) mês 2; c) mês 3; d) mês 4; e) mês 5; f) mês 6 e g) mês 7.	67
Figura 20- Boxplots a) cenário 1, b) cenário 2, c) cenário 3, d) cenário 10, e) cenário 11, f) cenário 12	70
Figura 21- Boxplots a) cenário 4, b) cenário 5, c) cenário 6, d) cenário 13, e) cenário 14, f) cenário 15	72

Figura 22- Boxplots a) cenário 7, b) cenário 8, c) cenário 9, d) cenário 16, e) cenário 17, f) cenário 18	74
Figura 23– Resistividade para as 18 combinações de fatores no mês 1	75
Figura 24- Resistividade para as 18 combinações de fatores no mês 4	76
Figura 25- Teor de umidade medido nas bombas ao longo dos 7 meses de teste: a) cenários 1, 2 e 3, b) cenários 4, 5 e 6, c) cenários 7, 8 e 9, d) cenários 10, 11 e 12, e) cenários 13, 14 e 15, f) cenários 16, 17 e 18	77
Figura 26- Densidade do solo no aparato experimental ao longo dos 7 meses de teste: a) cenários 1, 2 e 3, b) cenários 4, 5 e 6, c) cenários 7, 8 e 9, d) cenários 10, 11 e 12, e) cenários 13, 14 e 15, f) cenários 16, 17 e 18	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria dos solos	17
Tabela 2 - Métodos geofísicos e suas propriedades físicas.....	28
Tabela 3 - Resistividade dos materiais.....	31
Tabela 4 - Tipos de arranjos utilizados em medições utilizando a eletrorresistividade	33
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens da utilização de cada tipo de configuração dos eletrodos.....	34
Tabela 6 - Fatores considerados em pesquisas anteriores realizadas em escala experimental.....	36
Tabela 7 – PH da água da chuva	47
Tabela 8 – Granulometrias, teor de água e concentração do contaminante estudados	47
Tabela 9 – Descrição do soquete e da compactação do solo	51
Tabela 10 – Descrição do ensaio de eletrorresistividade	52
Tabela 11 – Configuração dos fatores e número de réplicas	54
Tabela 12 – Parâmetros do solo	55
Tabela 13 – Textura do solo.....	55
Tabela 14: Teste de normalidade para todos os dados coletados. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = amostra provém de uma população normal.	56
Tabela 15: ANOVA fatorial para análise da influência dos fatores granulometria, concentração de diesel, teor de umidade e aparato experimental. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.	56
Tabela 16: ANOVA pareada para análise da combinação da influência temporal com os demais fatores (granulometria, concentração de diesel, teor de umidade). P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.	57
Tabela 17– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 1. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.	59
Tabela 18 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% de teor de umidade para o mês 1. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.	59

Tabela 19– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 1. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	60
Tabela 20– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 4. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	61
Tabela 21 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% de teor de umidade para o mês 4. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	61
Tabela 22 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 4. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	62
Tabela 23- Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 5. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	62
Tabela 24 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% do teor de umidade para o mês 5. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	63
Tabela 25– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 5. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	63
Tabela 26- Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 7. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	64
Tabela 27 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% do teor de umidade para o mês 7. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	64
Tabela 28– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 7. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.	65
Tabela 29- Teste de Wilcoxon para cenários sem contaminante	69
Tabela 30 - Teste de Wilcoxon para cenários com 5% de óleo diesel	71
Tabela 31 - Teste de Wilcoxon para cenários com 10% de óleo diesel	73
Tabela 32 – Variação do teor de umidade entre os meses	77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis
LNAPL	<i>Light non-aqueous phase liquid</i> (fase líquida não aquosa leve)
DNAPL	<i>Dense non-aqueous phase liquid</i> (fase líquida não aquosa densa)
NAPL	<i>Non-aqueous phase liquid</i> (fase líquida não aquosa)
BTEX	Benzeno, Tolueno e Xileno
V_{MN}	Diferença de potencial medida pelos eletrodos M e N
ρ	Resistividade elétrica
I	Corrente elétrica
AM	Distância geométrica entre os eletrodos A e M
BM	Distância geométrica entre os eletrodos B e M
NA	Distância geométrica entre os eletrodos A e N
BN	Distância geométrica entre os eletrodos B e N
R	Resistência elétrica
K	Coefficiente geométrico
A	Área
L	Comprimento
ERT	Electrical Resistivity Tomography (Tomografia elétrica)
SEV	Sondegem elétrica vertical
MALM	Método <i>Mise-à-la-masse</i>
ABNT	Associação Brasileira de normas técnicas
PVC	Policloroeteno
ANOVA	Análise de variância
DC	Corrente contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PERGUNTAS DA PESQUISA.....	12
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES	15
2 REVISÃO TEÓRICA	17
2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO.....	17
2.2 ORIGEM DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR HIDROCARBONETOS	17
2.3 ZONA VADOSA, ZONA CAPILAR E ZONA SATURADA.....	19
2.4 COMPOSIÇÃO DO PETRÓLEO.....	19
2.4.1 Hidrocarbonetos aromáticos	19
2.4.2 Alcanos	20
2.4.3 Alcenos	20
2.4.4 Cicloalcanos	21
2.5 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DIESEL	21
2.6 DINÂMICA DOS HIDROCARBONETOS EM SUBSOLO	22
2.6.1 LNAPL	22
2.6.2 DNAPL	22
2.7 FASES DOS HIDROCARBONETOS APÓS A OCORRÊNCIA DE VAZAMENTOS	22
2.7.1 Fase livre	22
2.7.2 Fase adsorvida ou fase residual	23
2.7.3 Fase vaporizada	23
2.7.4 Fase dissolvida	23
2.8 BIODEGRADAÇÃO NATURAL DOS HIDROCARBONETOS.....	24
2.9 FATORES QUE AFETAM A BIODEGRADAÇÃO NATURAL DOS HIDROCARBONETOS.....	26
2.9.1 Tipo e a concentração de contaminantes	26
2.9.2 Temperatura	26
2.9.3 Teor de umidade	26
2.10 MÉTODOS GEOFÍSICOS	27
2.10.1 Polarização induzida	28

2.10.2 Eletroresistividade	30
2.10.3 Aplicação da eletroresistividade em laboratório	34
2.11 FATORES ANALISADOS EM PESQUISAS EM LABORATÓRIO	35
2.11.1 Granulometria	36
2.11.2 Concentração do contaminante	37
2.11.3 Teor de umidade	38
2.11.4 Tempo de permanência do contaminante no solo	38
2.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1. MATERIAIS	40
3.2. MÉTODO DE ABORDAGEM	41
3.3. MÉTODO DE PROCEDIMENTOS	42
3.3.1. Tipo de solo	43
3.3.2. Caracterização do solo	44
3.3.3. Preparação dos cenários	45
3.3.4. Aparato experimental	49
3.3.5. Compactação do solo	50
3.3.6 Medição da resistividade	51
3.3.7 Análise estatística	53
4. RESULTADOS	55
4.1 PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO	55
4.2 NORMALIDADE	55
4.3 INFLUÊNCIA DOS FATORES GRANULOMETRIA, A CONCENTRAÇÃO DE CONTAMINANTE E A TEOR DE UMIDADE	56
4.4 INFLUÊNCIA TEMPORAL	57
4.5 DIFERENÇA ENTRE OS CENÁRIOS	57
4.5.1 Mês 1	59
4.5.2 Mês 4	60
4.5.3 Mês 5	62
4.5.4 Mês 7	64
4.5.5 Verificação dos Pressupostos da ANOVA	66
4.6 ANÁLISE DA TENDÊNCIA TEMPORAL	68
4.6.1 Sem óleo diesel	68
4.6.2 Com 5% de óleo diesel	70
4.6.3 Com 10% de diesel	72

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS.....	74
4.7.1 Mês 1	74
4.7.2 Mês 4	76
4.8 TEOR DE UMIDADE NAS BOMBONAS	77
4.9 DENSIDADE DO SOLO NO APARATO EXPERIMENTAL	78
5 DISCUSSÃO	79
6 CONCLUSÃO	86
7 SUGESTÃO DE ESTUDOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

Os hidrocarbonetos são os principais componentes dos combustíveis fósseis. Os quais são utilizados intensamente, necessitando de uma ampla rede de transporte, distribuição e armazenamento, sendo frequente a ocorrência de vazamentos (CASTELLO; MOREIRA; BRAGA, 2011).

Entre os combustíveis fósseis, destaca-se o óleo diesel, combustível derivado do petróleo mais consumido mundialmente (OPEC, 2017), responsável por cerca de 29,8% do consumo e formado principalmente por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Esses hidrocarbonetos são extremamente nocivos aos seres humanos, uma vez que são lipossolúveis na membrana celular e são absorvidos de forma instantânea pelo organismo por via oral, dermal ou inalação, sendo posteriormente armazenada no tecido adiposo. Após a sua absorção, ocorre a formação de compostos com propriedades carcinogênicas e mutagênicas (JACQUES *et al.*, 2007a; JACQUES; BENTO; CAMARGO, 2007b).

A contaminação do solo e da água subterrânea por hidrocarbonetos são com frequência provenientes de acidentes no transporte de derivados do petróleo, perfuração de dutos e vazamentos em tanques de armazenamento enterrados. O problema ambiental decorrente se torna ainda mais grave devido à complexidade desses contaminantes, uma vez que eles podem assumir quatro diferentes fases de contaminação após o vazamento: adsorvida, livre, dissolvida e vapor. Dificultando a contenção e remediação desses poluentes (AZAMBUJA; CANCELIER; NANNI, 2000).

As investigações de contaminações por hidrocarbonetos são normalmente executadas por meio de métodos diretos de prospecção, ou seja, pela realização de sondagens mecânicas e coleta de amostras para análises químicas (ALEGRIA; MARTINHO; ALMEIDA, 2009). Apesar de eficazes, esses métodos apresentam seu custo elevado e podem ser morosos. Com isso, os métodos geofísicos são considerados uma alternativa para a detecção de solos contaminados, tendo em vista que a sua utilização permite a delimitação dos contaminantes de maneira rápida e não invasiva (PARK *et al.*, 2016).

Destacam-se o emprego das técnicas geofísicas de radar de penetração no solo (GPR), tomografia elétrica (ERT) e polarização induzida (IP) no estudo solos

contaminados com combustíveis fósseis (GIAMPAOLO *et al.*, 2014), sendo que desde a década de 1980 métodos geofísicos são descritos como forma de detecção dessas contaminações (STIERMAN, 1984; BLUM, 1989).

Entretanto, a correta interpretação dos dados após a aplicação dos métodos geofísicos *in situ* demanda informações preexistentes obtidas em estudos em escala laboratorial, como, os parâmetros geofísicos do meio com e sem o contaminante. No caso da técnica de eletrorresistividade, por exemplo, a resistividade elétrica ($\Omega.m$) do solo é essencial para interpretação das pseudo-seções de resistividade aparente, obtidas por meio do emprego desta técnica *in situ*.

Entre as pesquisas laboratoriais que buscam determinar a influência de contaminantes nas propriedades de um solo, os métodos geofísicos mais utilizados são a eletrorresistividade (KIM; OH; PARK, 2007; LIU; LIU; CAI, 2015; BIAN *et al.*, 2016; KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018) e a polarização induzida em conjunto com medidas DC (corrente contínua) (MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006; ALEGRIA; MARTINHO; ALMEIDA, 2009; MARTINHO *et al.*, 2010). Desta forma, o presente trabalho irá empregar a eletrorresistividade devido a ampla utilização neste tipo de estudo.

Os procedimentos em escala laboratorial permitem, além da configuração de diferentes cenários, considerando diferentes granulometrias, teores de umidade, tipos e concentrações do combust (BINLEY *et al.*, 2005). Desta forma, muitos estudos laboratoriais têm se dedicado a obtenção da resistividade de solos contaminados por combustíveis fósseis avaliando a influência de fatores como mineralogia, granulometria, teor de umidade do solo e o tipo e a concentração do contaminante (MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006; KIM; OH; PARK, 2007; ALEGRIA, MARTINHO; ALMEIDA, 2009; MARTINHO *et al.*, 2010; LIU; LIU; CAI, 2015; BIAN *et al.*, 2016; KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018). Os principais resultados indicam que i) resistividade dos solos com maiores granulometrias após sofrer uma contaminação é maior que nos solos com menores granulometrias e ii) solos que possuem maiores concentrações de contaminantes possuem resistividades maiores que nos solos com menores concentrações de contaminantes.

Muitas destas pesquisas analisam o efeito de mais de um fator sobre a resistividade do meio como Martinho, Almeida e Matias (2006), que avaliaram o efeito

de dois fatores (granulometria e concentração do contaminante) sobre a resistividade ou mesmo Kolay, Burra e Kumar (2018), que avaliaram a resistividade da contaminação do solo por duodecano em função de três fatores (granulometria, concentração do contaminante e tempo do contaminante no solo). Diante da quantidade de fatores que podem influenciar a resistividade obtida por contaminação, na presente pesquisa pretende-se trabalhar de com o efeito controlado de quatro fatores (granulometria, concentração do contaminante, teor de umidade e tempo do contaminante no solo) sobre um solo contaminado com óleo diesel e avaliar o efeito da interação desses fatores.

Dentre os quatro fatores escolhidos para esta pesquisa, destaca-se o tempo de contaminação que está relacionado com a permanência do hidrocarboneto no solo. Como o contaminante possui em sua composição carbonos orgânicos, esses podem ser biodegradados por processos microbianos e conseqüentemente a resistividade do meio pode se alterar em função dos produtos metabólicos formados, como ácido orgânicos, carbônicos e biosulfactantes, que aumentam a sua condutividade. (ATEKWANA; ATEKWANA, 2010).

Trabalhos descritos na literatura avaliam o efeito do tempo sobre a resistividade do solo contaminado, combinado com a influência do teor de umidade do meio (KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018, BIAN *et al.*, 2016, LIU; LIU; CAI, 2015, MARTINHO *et al.*, 2010, ALEGRIA, MARTINHO; ALMEIDA, 2009). A principal conclusão destes trabalhos é que o solo recém contaminado possui valores de resistividades elevados, mas que reduzem com o passar do tempo, devido ao processo de biodegradação do contaminante.

Entretanto, destaca-se uma ausência de trabalhos que avaliam a influência de diferentes teores de umidade na biodegradação de solos contaminados. De acordo com Reis (2009), solos com teores de umidade entre 50% e 80% da capacidade de campo possuem uma melhor degradação do contaminante, pois, teores de umidade inferiores a 50% afetam o metabolismo microbiano, devido a movimentação dos microrganismos e o transporte dos nutrientes e umidades superiores a 80% limitam o transporte de oxigênio no solo. A degradação natural do contaminante é uma potencial forma de remediação do processo de contaminação, e o conhecimento da resistividade em solos contaminados e que possuem diferentes teores de umidade, permite adoção de medidas recuperação do solo mais eficientes. Dessa forma, a

presente pesquisa visou avaliar a influência de diferentes teores de umidade na variação da resistividade do solo.

Experimentos controlados em laboratório foram realizados em um aparato experimental cilíndrico de PVC, associado a dois eletrodos de cobre de injeção de corrente e dois de medição de potencial. Solos não saturados (com diferentes adições de água de 30%, 40% e 50%) de diferentes granulometrias (<2 mm a 0,06mm e <0,06mm) e diferentes concentrações de óleo diesel (0%, 5% e 10%) serão testados. O efeito do tempo será avaliado em 5 medições mensais para cada cenário, com 5 réplicas. Por meio da ferramenta estatística ANOVA, o efeito da variação dos fatores sobre a resistividade será avaliado.

As hipóteses deste estudo são: i) Os diferentes teores de umidade influenciam a variação da resistividade ao longo do tempo de análise; ii) a interação entre a granulometria e o teor de umidade do solo, a concentração e tempo explicam significativamente a variação da resistividade no solo; iii) em solos contaminados ocorre a estabilização da resistividade associada a diminuição da taxa de biodegradação do contaminante.

1.1 PERGUNTAS DA PESQUISA

Como diferentes teores de umidade influenciam a variação da resistividade ao longo de sete meses de análise?

Como os fatores granulometria, teor de umidade, concentração do contaminante e tempo de biodegradação interagem influenciando os valores de resistividade?

Em solos contaminados ocorre a estabilização da resistividade ao longo de sete meses de análise?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Verificar em laboratório a influência conjunta de quatro fatores (granulometria e teor de umidade do solo, tempo e concentrações de contaminação por hidrocarbonetos) na resistividade do solo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar um aparato experimental que permita medir a resistividade do solo.
- Analisar o padrão da influência dos diferentes teores de umidade na variação dos valores de resistividade, em diferentes combinações, ao longo do tempo de análise.
- Analisar se a interação entre os fatores considerados nessa pesquisa, como a granulometria e o teor de umidade do solo, a concentração do contaminante e tempo explicam significativamente a variação da resistividade no solo.
- Analisar se em solos contaminados ocorre a estabilização da resistividade associada a diminuição da taxa de biodegradação do contaminante.

1.3 JUSTIFICATIVA

O óleo diesel é o combustível derivado do petróleo mais produzido no Brasil, representando 42% da produção nacional. Esse combustível é composto em sua maior parte por hidrocarbonetos, que possuem em sua composição os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) (MAZZUCO, 2004; ANP, 2018).

Essas substâncias são extremamente nocivas aos seres humanos, uma vez que são lipossolúveis na membrana celular e são absorvidos de forma instantânea pelo organismo por via oral, dermal ou inalação, sendo posteriormente armazenada no tecido adiposo. Após a sua absorção, ocorre a formação de compostos com propriedades carcinogênicas e mutagênicas (JACQUES *et al.*, 2007a; JACQUES; BENTO; CAMARGO, 2007b).

Estudos demonstram que os métodos geofísicos, principalmente os elétricos, são bem sucedidos na detecção de contaminantes devido à grande diferença nas propriedades elétricas entre essas substâncias, a água e o solo, resultando em um contraste entre eles (BRAGA; MOREIRA, 2009).

Castelluccio *et al.* (2018) utilizaram os métodos da eletrorresistividade e da polarização Induzida para avaliar áreas contaminadas por querosene em áreas situadas na Itália e na Índia. Os autores observaram que a contaminação na área situada na Itália, por ser mais antiga, não possuía grandes diferenças entre as partes do solo contaminadas e não contaminadas. Enquanto, na área situada na Índia, por possuir uma contaminação mais recente, e ainda ativa, existia uma diferença de contraste entre essas partes.

Cassidy *et al.* (2001) também realizaram um estudo geofísico de campo durante um período de 120 dias, o que possibilitou identificar uma variação da resistividade em um solo contaminado com hidrocarbonetos ao longo desse período. E em conjunto a essa pesquisa, foram feitos experimentos laboratoriais que comprovassem que essa alteração da resistividade estava associada a biodegradação desses hidrocarbonetos.

Os autores utilizaram nesses experimentos amostras de solo de um local contaminado e a lavaram repetidas vezes para remover os constituintes solúveis, posteriormente esses solos foram contaminados novamente com óleo diesel e os poros foram cheios de água para simular uma contaminação na zona saturada do solo. Com essa pesquisa foi constatada uma redução da resistividade causada por um aumento no total de sólidos dissolvidos devido à dissolução mineral e à produção de ácidos orgânicos e biosulfactantes (CASSIDY *et al.*, 2001).

A realização de pesquisas em escala experimental pode ser utilizada para conseguir informações que complementem os dados obtidos com as pesquisas *in situ*, podendo por meio delas simular de forma rápida diferentes cenários, variando o tipo e as propriedades do solo e o tipo e a concentração do contaminante (BINLEY *et al.*, 2005).

Como na pesquisa de Martinho, Almeida e Matias (2006), que avaliaram a variação da resistividade em um solo contaminado por gasolina, considerando duas granulometrias diferentes desse solo: entre 2mm e 1mm e <1mm; e diversas concentrações de gasolina: 0%, 7%, 14% e 21%. E de acordo com esta pesquisa, a amostra com maior resistividade foi a que considerou granulometria entre 2mm e 1mm e concentração de gasolina de 21% e a amostra com menor resistividade foi a que considerou granulometria < 1mm e concentração de gasolina de 0%. Pôde-se concluir

que o aumento da resistividade está diretamente relacionado com o aumento do tamanho dos grãos e com a concentração do contaminante.

Estudos que avaliam solos contaminados por hidrocarbonetos, constataram que a biodegradação desse contaminante sob condições aeróbicas e anaeróbicas podem mudar de forma substancial as condições biogeoquímicas do solo impactado. Essas mudanças ocorrem, pois, os processos microbianos geram produtos metabólicos, como ácidos orgânicos, carbônicos e biosulfactantes, aumentando a sua condutividade. (CASSIDY *et al.*, 2001; ATEKWANA; ATEKWANA, 2010).

Como mostrado no estudo de Alegria, Martinho e Almeida (2009), que realizaram uma análise experimental para avaliar o comportamento de um solo contaminado com óleo diesel ao longo do tempo. Nos primeiros dias de análise, o óleo diesel em contato com o solo causou um aumento dos valores de resistividade. Mas com o passar do tempo ocorreu uma diminuição do valor desse parâmetro, que está relacionado com a ocorrência da degradação do diesel. E após 8 meses de análise, a resistividade passou a ser relativamente constante, isso pode ser explicado pela menor disponibilidade de contaminante no solo, o que resulta em uma menor disposição de partículas de hidrocarbonetos, e conseqüentemente, uma diminuição das fontes de carbono utilizados pelos agentes biodegradantes.

Com isso, uma pesquisa em escala experimental é fundamental para avaliar de maneira rápida e controlada o comportamento resistivo de um solo contaminado ao longo do tempo. Assim é possível avaliar diferentes cenários, que são simulados a partir da variação das propriedades do solo e do tipo e concentração do contaminante, oferecendo diferentes valores de resistividade para cada um desses cenários, contribuindo com informações para aplicação da técnica *in situ*.

1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES

- Fenômenos físicos podem atuar de maneira diferente na escala laboratorial e escala *in situ*, o que pode provocar alterações nos valores de resistividade obtidos em laboratório.
- Mesmo com o armazenamento das amostras em bombonas vedadas, após os 7 meses de análise houve uma pequena diminuição do teor de umidade previamente estabelecido para cada amostra.

- Variações não controladas no estoque das amostras ao longo do tempo, como no momento da homogeneização do solo, podem gerar diminuição na concentração do contaminante.
- Necessidade de um monitoramento mensal da granulometria e do contaminante.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO

O solo é formado por um sistema disperso constituído por três fases: sólida, líquida e gasosa, ou seja, é um material composto por um conjunto de partículas sólidas que deixam entre si espaços, chamados de vazios, que são preenchidos parcialmente ou integralmente pela água e pelo ar. O comportamento dos solos é ditado pela proporção existente de cada uma dessas fases em sua composição. Devido a isso é importante determinar as características físicas do solo, como a granulometria, porosidade e teor de umidade, que estão diretamente associadas à proporção de água e ar existentes no solo (CAPUTO, 1987; PINTO, 2016).

A granulometria do solo consiste nas dimensões das suas partículas, sendo divididas em pedregulho, areia, silte e argila (Tabela 1). O teor de umidade representa a razão entre o peso da água contida solo e o peso da parte sólida contida em um volume de solo. A porosidade está relacionada à porção relativa de vazios de um solo e ela depende do tamanho dos grãos e da maneira como eles estão dispostos (CAPUTO, 1987; ABNT, 1995; PINTO, 2016).

Tabela 1 - Granulometria dos solos

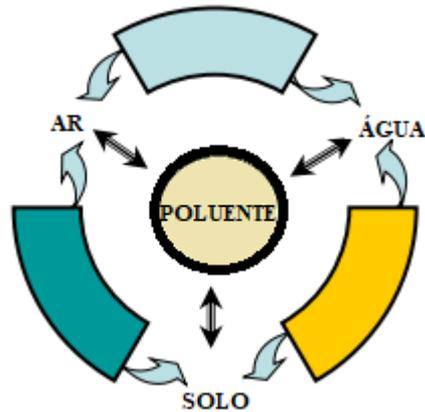
Frações constituintes do solo	Tamanho das partículas
Pedregulho	60 mm a 2 mm
Areia	2 mm a 0,06 mm
Silte	0,06 mm a 0,002 mm
Argila	< 0,002 mm

Fonte: (ABNT, 1995).

2.2 ORIGEM DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR HIDROCARBONETOS

O solo possui uma interação contínua com outros elementos ambientais, como, o ar e a água subterrânea (Figura 1), ou seja, sua contaminação pode se propagar por diferentes meios e com isso representar riscos potenciais para a saúde humana, recursos hídricos, ecossistemas e outros receptores ambientais (BEFKADU; CHEN, 2018).

Figura 1 - Interação contínua entre solo, água e ar e a propagação de poluentes



Fonte: Adaptado de (BEFKADU; CHEN, 2018).

Um tipo de poluição do solo que tem se tornado muito comum é a por derivados do petróleo, visto que sua exploração, extração, processamento, e utilização têm aumentado devido à crescente procura de energia causada pelo crescimento da indústria (CASTELLO; MOREIRA; BRAGA, 2011).

Além disso, os hidrocarbonetos são os principais componentes de combustíveis fósseis, como a gasolina e o óleo diesel, que são amplamente utilizados no Brasil para o abastecimento de veículos automotores. Por serem utilizados intensamente, esses combustíveis necessitam de uma ampla rede de transporte, distribuição e armazenamento, sendo frequente a ocorrência de vazamentos (CASTELLO; MOREIRA; BRAGA, 2011).

A contaminação do solo e da água subterrânea por hidrocarbonetos possuem diversas origens, como: vazamentos e derramamentos nas refinarias, nos locais de fabricação de derivados do petróleo e nos centros de distribuição, acidentes no transporte de derivados do petróleo e na perfuração de dutos, mas a forma mais comum são vazamentos em tanques de armazenamento enterrados (STOFELA, 2014).

Esse problema ambiental se torna ainda mais grave devido à complexidade desses contaminantes, uma vez que eles possuem uma grande variedade de componentes que dão origem a quatro diferentes fases de contaminação: adsorvida, livre, advecção e dispersão. Isto dificulta a contenção e remediação desses poluentes (AZAMBUJA; CANCELIER; NANNI, 2000).

Os vazamentos em tanques de armazenamento enterrados ocorrem devido à falta de cuidado na sua instalação ou falta de manutenção ao longo do tempo, uma vez que a falta de aplicação de uma proteção catódica, em conjunto com o contato direto do material do tanque de armazenamento com o solo aceleram a sua corrosão, comprometendo a integridade do material (MARIANO, 2006).

2.3 ZONA VADOSA, ZONA CAPILAR E ZONA SATURADA

A água ao infiltrar no subsolo, parte fica retida nas regiões mais próximas do solo, pela ação das forças de adesão e de capilaridade, constituindo a zona vadosa. Parte dessa água escoar por ação da gravidade, constituindo a zona saturada. Já a zona capilar se estende entre a superfície freática e o limite de ascensão capilar. A ascensão capilar é um fenômeno que descreve o movimento da água nos poros do solo (Figura 3a) (BINLEY *et al.*, 2002; SCHNEIDER, 2012).

2.4 COMPOSIÇÃO DO PETRÓLEO

O petróleo é uma substância composta por hidrocarbonetos, sendo esses formados por átomos de carbono e hidrogênio em maiores quantidades, além de enxofre, nitrogênio e oxigênio em menores quantidades. Esses conjuntos de átomos dão origem a uma mistura complexa composta principalmente de hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos aromáticos, resinas e asfaltenos e a sua diferenciação ocorre a partir variação entre as proporções de seus componentes (HECKMANN *et al.*, 2011).

Os hidrocarbonetos presentes no petróleo são distribuídos em quatro classes principais, sendo elas definidas a partir de sua composição molecular: aromáticos, alcanos, alcenos e cicloalcanos.

2.4.1 Hidrocarbonetos aromáticos

Os hidrocarbonetos aromáticos são compostos formados a partir de uma ou mais cadeias benzênicas e estão presentes em praticamente todos os tipos de petróleo, mesmo que em baixas concentrações na maioria deles. Esses compostos merecem destaque, visto que são os hidrocarbonetos que possuem maior toxicidade, lenta biodegradação e apresentam efeitos crônicos e carcinogênicos aos seres humanos (KOLESNIKOVAS; OLIVEIRA; DUARTE, 2015) .

Uma exemplificação desses compostos são os HPA, que são formados apenas por átomos de carbono e hidrogênio e possuem seus arranjos na forma de dois ou mais anéis aromáticos. Quanto maior o número de anéis aromáticos, maior a persistência desses contaminantes no meio ambiente (JACQUES *et al.*, 2007a; MEBARKA *et al.*, 2012)

Estima-se que existam 16 principais hidrocarbonetos policíclicos aromáticos que ao entrar em contato com o meio ambiente resultam em maiores problemas ambientais devido à sua toxicidade, tais como: fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo (a) antraceno, criseno, o benzo (a) pireno, benzo (ghi) perileno, indeno (1,2,3-cd) pireno (MEBARKA *et al.*, 2012; XU *et al.*, 2016)

Essas substâncias são extremamente nocivas aos seres humanos, uma vez que são lipossolúveis na membrana celular e são absorvidas de forma instantânea pelo organismo por via oral, dermal ou inalação, sendo posteriormente armazenada no tecido adiposo (JACQUES *et al.*, 2007a).

Após a absorção e metabolismo dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos nos organismos dos seres humanos, ocorre a formação de compostos com propriedades carcinogênicas e mutagênicas, existindo relatos de casos de câncer no pulmão, intestino, fígado, pâncreas e na pele, em pessoas que possuíam esses compostos presentes em seus organismos (JACQUES; BENTO; CAMARGO, 2007b).

2.4.2 Alcanos

Os Alcanos também chamados de parafinas ou alifáticos saturados são hidrocarbonetos de cadeias normais e ramificadas e representam a maioria dos compostos produzidos a partir do petróleo. Eles são incolores, inodoros, possuem baixa reatividade, baixa toxicidade e são facilmente biodegradados (KOLESNIKOVAS; OLIVEIRA; DUARTE, 2015).

2.4.3 Alcenos

Os Alcenos ou olefinas são hidrocarbonetos de cadeia aberta e que se diferem dos alcanos apenas por possuir ligações duplas entre os seus átomos de carbono. Esses componentes normalmente estão ausentes ou aparecem em pequenas quantidades no petróleo, mas são abundantes em produtos de refino como a gasolina (KOLESNIKOVAS; OLIVEIRA; DUARTE, 2015).

2.4.4 Cicloalcanos

Os cicloalcanos, também chamado de naftas, são hidrocarbonetos de compostos cíclicos, ou seja, possuem cadeias fechadas e saturadas e compreendem a segunda maior fração da maioria dos petróleos (LOYOLA; BARROS, 2010).

2.5 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DIESEL

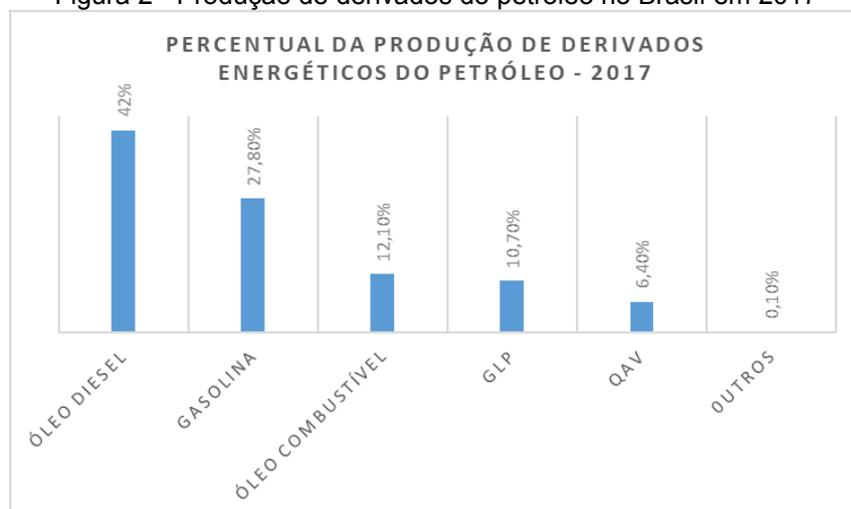
O óleo diesel é o combustível derivado do petróleo mais consumido e que representa 29,8% do consumo mundial. Sendo que até 2040 estima-se que esse consumo continue sendo de cerca de 30% (OPEC, 2017).

No Brasil, a maior parte do petróleo processado é destinado a produção de combustíveis, sendo que 42% são destinados a produção de óleo diesel, (Figura 2) (ANP, 2018).

O óleo diesel é formado por hidrocarbonetos, que possuem em sua estrutura cerca de 8 a 38 átomos de carbono (C8 a C38), sendo que aproximadamente 40% são alcanos, 39% são iso e cicloalcanos, 20% de hidrocarbonetos aromáticos e o restante é formado por isoprenóides como enxofre, oxigênio e nitrogênio. No entanto, a composição de um óleo diesel pode variar de acordo com a fonte do petróleo, métodos de produção e processos de destilação (MAZZUCO, 2004).

Além dos hidrocarbonetos de cadeia simples, suas partículas possuem cadeias maiores, conduzindo a uma menor volatilidade e conseqüentemente menor solubilidade na água em relação à gasolina (MARIANO, 2006)

Figura 2 - Produção de derivados do petróleo no Brasil em 2017



Fonte: (ANP, 2018)

2.6 DINÂMICA DOS HIDROCARBONETOS EM SUBSOLO

Os hidrocarbonetos são compostos imiscíveis em água e devido a isso o seu escoamento em meios saturados é dividido em dois grupos, separados de acordo com a densidade de cada um deles: 1) *light non-aqueous phase liquid* (LNAPLs) ou fase líquida não aquosa leve e 2) *dense non-aqueous phase liquid* (DNAPLs) ou fase líquida não aquosa densa. A fase composta, ou seja, que se caracteriza pela junção dos líquidos de fase densa e leve recebe a denominação de NAPL (non-aqueous phase liquid) ou fase líquida não aquosa (MARIANO, 2006; HALIHAN *et al.*, 2017).

2.6.1 LNAPL

Os LNAPLs são moderadamente solúveis e altamente móveis e avaliar sua variação de concentrações e distribuição na subsuperfície pode ser extremamente difícil, por possuir densidade menor que a água (HALIHAN *et al.*, 2017).

2.6.2 DNAPL

Os DNAPLs são caracterizados por possuir densidade maior que a água. Os tipos de hidrocarbonetos que possuem essas características, como hidrocarbonetos clorados, antraceno, pireno e fenol, estão associados na maioria das vezes a atividades industriais (VIVIAN, 2015).

2.7 FASES DOS HIDROCARBONETOS APÓS A OCORRÊNCIA DE VAZAMENTOS

Normalmente, os vazamentos de combustíveis, como o óleo diesel, promovem diferentes fases de contaminação, (Figura 3a) e (Figura 3b).

2.7.1 Fase livre

A fase livre consiste na formação de uma camada do poluente acima do nível freático, sendo que a espessura dessa contaminação está relacionada com a quantidade de contaminante derramado e a dinâmica das águas subterrâneas (MARIANO, 2006).

De acordo com análises geofísicas foi constatado que a fase livre possui características mais condutivas em relação ao contaminante no momento do

vazamento, isso ocorre não só pela mineralização do hidrocarboneto, mas também pela sua interação com a água e o ar (BRAGA; MOREIRA; CARDINALI, 2008)..

2.7.2 Fase adsorvida ou fase residual

Esta fase corresponde a um solo cuja contaminação encontra-se na região entre a fonte emissora de poluente e o nível freático do solo. É caracterizada por uma película de hidrocarbonetos envolvendo as partículas de solo ou as descontinuidades existentes nas rochas (AZAMBUJA; CANCELIER; NANNI, 2000).

Na fase adsorvida, o solo tende a ter sua resistividade elétrica aumentada, isso ocorre principalmente em solos argilosos e para contaminações recentes, tendo em vista que a biodegradação dos hidrocarbonetos no solo é rápida e pode implicar na formação de ácidos orgânicos e sais, diminuindo o contraste elétrico (BRAGA; MOREIRA; CARDINALI, 2008).

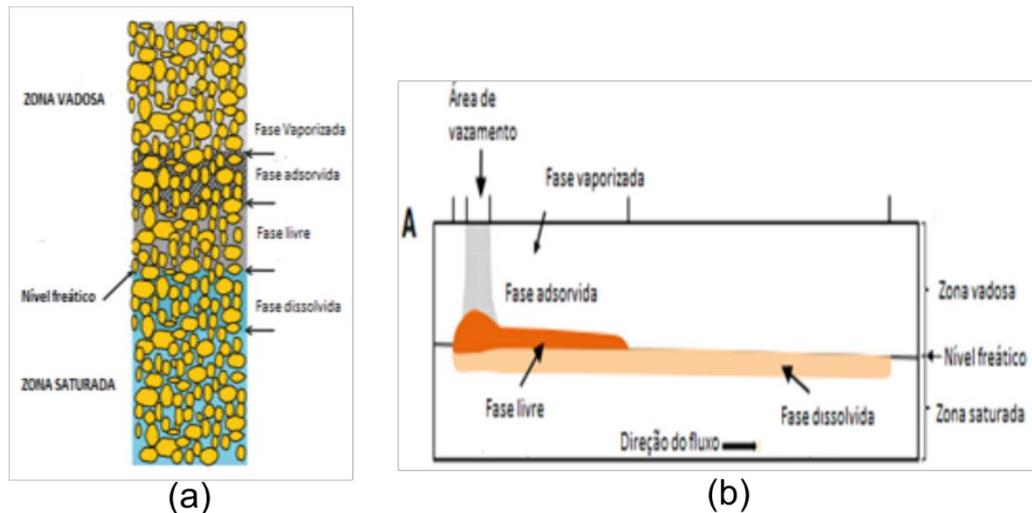
2.7.3 Fase vaporizada

A fase vaporizada é uma fase gasosa composta de partículas voláteis presentes nos combustíveis e que ocupa vazios do solo ou rocha, sendo mais importante para os hidrocarbonetos de menor ponto de vaporização, como aqueles que compõem a gasolina. Essa fase é pouco relevante em relação as investigações geofísicas (AZAMBUJA; CANCELIER; NANNI, 2000).

2.7.4 Fase dissolvida

Essa fase está relacionada a contaminação por compostos polares, ou seja, que são solúveis em água, como é caso de fluidos menos viscosos como a gasolina. Devido a essa solubilidade em água, o contaminante possui maior mobilidade e com isso é transportado mais facilmente para as regiões abaixo do nível freático (VIVIAN, 2015)

Figura 3 - Contaminação do solo (a) Fases de contaminação dos hidrocarbonetos no solo (b) Localização das fases de contaminação dos hidrocarbonetos no solo após o vazamento.



Fonte: Adaptado de (ATEKWANA; ATEKWANA, 2010)

2.8 BIODEGRADAÇÃO NATURAL DOS HIDROCARBONETOS

A degradação de contaminantes por ação de microrganismos é denominada biodegradação e ela ocorre a partir da ação de fungos e bactérias que utilizam os hidrocarbonetos como substrato para o seu crescimento, transformando-os em carbono e energia, e como consequência, degradando esses contaminantes que possuem longos períodos de resistência no ambiente (NISENBAUM *et al.*, 2013; CORIOLANO; FILHO, 2016).

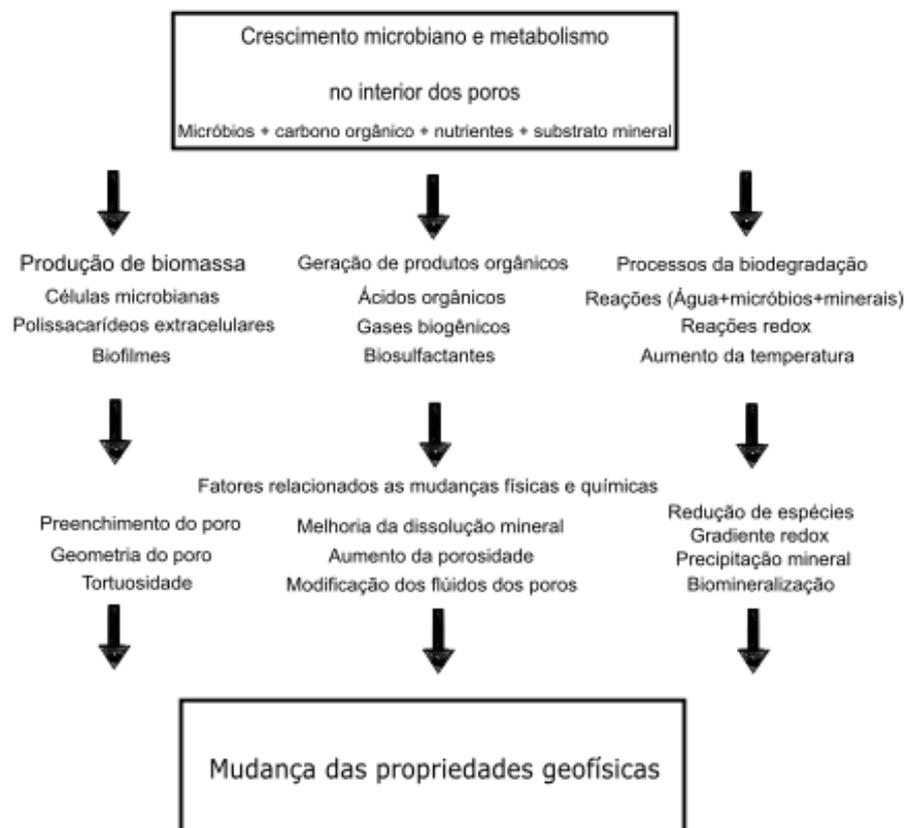
O entendimento da biodegradação é fundamental em estudos relacionados a contaminações por hidrocarbonetos, visto que cerca de 60% a 90% das substâncias que fazem parte da composição do petróleo são biodegradáveis. Com isso, ela auxilia na redução da massa dos contaminantes e por consequência limita o transporte dos hidrocarbonetos presentes no petróleo (MAZZUCO, 2004; LOYOLA; BARROS, 2010). Um exemplo dessa redução ocorre no processo de biodegradação do benzeno, tolueno, xileno (BTEX) e HPA, que pode provocar a conversão dos contaminantes em produtos inorgânicos, como o dióxido de carbono e a água (MAZZUCO, 2004).

A biodegradação dos hidrocarbonetos altera as propriedades geoquímicas e geofísicas do solo contaminado (Figura 4). Isso ocorre pois, os hidrocarbonetos possuem em sua composição carbonos orgânicos que são fonte de energia para os microorganismos, que durante os processos microbianos produzem ácidos orgânicos, ácidos carbônicos e biosulfactantes que aumentam a condutividade do solo (CASSIDY *et al.*, 2001).

Alegria, Martinho e Almeida (2009) comprovaram que, com o passar do tempo, o aumento inicial da resistividade, causado pela contaminação do óleo diesel diminuiu, estando relacionado a ocorrência da degradação do combustível. Martinho *et al.* (2010) relacionam a alteração da resistividade com a biodegradação do óleo diesel, e também mostram uma associação com a variação da porosidade. De acordo com os autores, a diminuição da porosidade após 4 meses é de 9% e após 12 meses é de 15%. Essa diminuição de porosidade pode ser atribuída a aumento da agregação de partículas do solo, que resulta na alteração da dimensão e geometria dos poros.

Além da biodegradação e da variação da porosidade, existem também outros fatores que alteram os valores de resistividade no solo, no momento da contaminação: 1) o tipo e a concentração do contaminante, 2) a forma que o poluente é liberado no ambiente, 3) se é contínua ou única liberação, 4) a distribuição do contaminante em relação a água e o ar presentes no solo e aos processos hidrológicos, como a recarga sazonal e 5) o transporte por advecção (ATEKWANA; ATEKWANA, 2010).

Figura 4 - Mudança das propriedades geofísicas provocadas pela biodegradação dos hidrocarbonetos



Fonte: Adaptado de (ATEKWANA; ATEKWANA, 2010)

2.9 FATORES QUE AFETAM A BIODEGRADAÇÃO NATURAL DOS HIDROCARBONETOS

2.9.1 Tipo e a concentração de contaminantes

A possibilidade de componentes do petróleo sofrer biodegradação varia de acordo com a concentração e com o tipo de poluente, e conseqüentemente com o tamanho da molécula do hidrocarboneto que o compõe. Geralmente, um aumento no número de anéis aumenta a estabilidade química e a hidrofobicidade da molécula de HPA, tornando-o menos biodegradável. (LOYOLA; BARROS, 2010).

2.9.2 Temperatura

A alteração da temperatura é relevante não só para as características físicas dos contaminantes presentes no solo, como a solubilidade e a volatilidade, mas também no metabolismo microbiano. A biodegradação dos hidrocarbonetos pode ocorrer em uma ampla faixa de temperatura. Mas a melhor faixa para que esse processo ocorra de maneira satisfatória é de 25°C a 35°C. (JACQUES; BENTO; CAMARGO, 2007b; REIS, 2009).

2.9.3 Teor de umidade

Em diferentes pesquisas que aplicam métodos geofísicos em escala laboratorial estuda-se a influência da variação do teor de umidade de um solo nas características de um poluente inserido nele. Algumas simulam uma contaminação da zona saturada do solo, ou seja, mantendo o teor de umidade em 100% (KIM; OH; PARK, 2007) e outras simulam a contaminação na zona não saturada, ou seja, com teores de umidade inferiores a 100% (ALEGRIA; MARTINHO; ALMEIDA, 2009).

A redução dos teores de umidade afeta o metabolismo microbiano de forma negativa, visto que altera a movimentação dos microrganismos e o transporte dos nutrientes. Durante o processo de biodegradação em solos contaminados, o teor de umidade deve ser mantido entre 50-80% da capacidade de campo do solo para que taxas ótimas de degradação sejam obtidas, pois umidades excessivas limitam o transporte de oxigênio no solo (REIS, 2009).

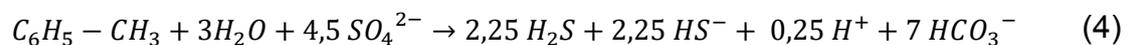
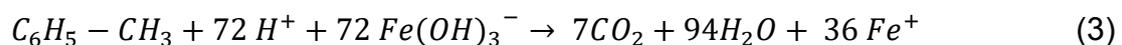
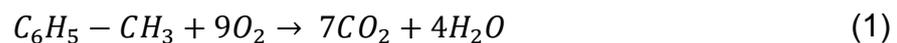
A capacidade de campo é definida como o limite de retenção hídrica no solo, ou seja, quando todos os macroporos do solo estão totalmente preenchidos (MANTOVANI et al., 2009).

2.9.4 Presença de oxigênio

Em ambientes naturais, como o solo, a matéria orgânica pode ser mineralizada aerobicamente e anaerobicamente, entretanto a degradação microbiana do petróleo e seus produtos refinados é muito mais rápida quando ocorre na presença de oxigênio (LOYOLA; BARROS, 2010)

Para que a biodegradação do hidrocarboneto ocorra é necessário que exista uma reação de oxirredução, em que o poluente sofrerá oxidação, ou seja, será o doador de elétrons e em contrapartida um acceptor de elétrons será reduzido. As bactérias aeróbicas utilizam o oxigênio molecular como acceptor de elétron (Equação 1) e bactérias anaeróbicas utilizam outros componentes, como o nitrato (Equação 2), óxidos de ferro (Equação 3) e sulfato (Equação 4). Sendo que o produto dessa reação é gás carbônico e água (MARIANO, 2006).

O oxigênio além de ser utilizado pelos microrganismos como acceptor final de elétrons na respiração aeróbia, também é utilizado como substrato nas reações biodegradativas catalisadas pela enzima oxigenase. Isto inclui o rompimento dos anéis, a hidroxilação dos compostos aromáticos e a oxidação dos compostos alifáticos (REIS, 2009).



2.10 MÉTODOS GEOFÍSICOS

Os métodos geofísicos são utilizados para obter respostas que estão associadas as características físicas de cada material, como, rochas, minerais, água, vazios e podem ser classificados em dois tipos: i) os métodos passivos, que detectam variações existentes dentro dos campos naturais da Terra e ii) os métodos ativos. Inseridos nesses dois grupos, existem vários tipos de métodos empregados e cada um deles é sensível a uma propriedade física (Tabela 2) (REYNOLDS, 2010).

Tabela 2 - Métodos geofísicos e suas propriedades físicas.

Método geofísico		Tipo de método	Propriedades físicas
Sísmico		Sinais artificiais	Módulo de elasticidade e densidade
Gravitacional		Campos naturais	Densidade
Magnético		Campos naturais	Susceptibilidade magnética
Elétrico	Eletrorresistividade	Sinais artificiais	Condutividade elétrica
	Polarização induzida		Capacitância
Eletrorresistividade	Georadar	Sinais artificiais	Constante dielétrica

Fonte: (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009; REYNOLDS, 2010).

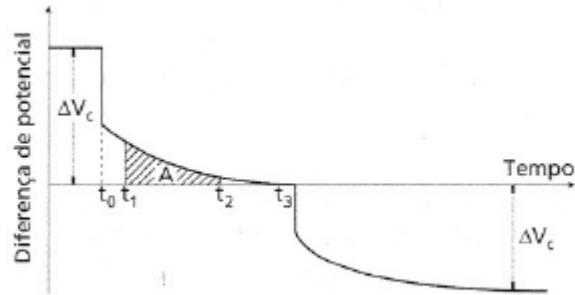
Em pesquisas em escala laboratorial que buscam determinar a influência de contaminantes nas propriedades de um solo, os métodos geofísicos mais utilizados são a eletrorresistividade (KIM; OH; PARK, 2007; LIU; LIU; CAI, 2015; BIAN *et al.*, 2016; KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018) e a polarização induzida (MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006; ALEGRIA; MARTINHO; ALMEIDA, 2009; MARTINHO *et al.*, 2010).

2.10.1 Polarização induzida

A polarização induzida, assim como a eletrorresistividade, é um método elétrico que ocorre a partir da injeção da corrente elétrica contínua para o interior do solo, por dois eletrodos de injeção de corrente (A e B), e que posteriormente é interrompida abruptamente. Então, a tensão entre os eletrodos de medição de potencial leva um tempo finito e mensurável para reduzir a zero (Figura 5). Isso ocorre pelo fato da superfície que a corrente elétrica foi injetada se comportar como um capacitor e absorver a carga elétrica. Com isso, é possível obter a diferença de potencial dada pela diferença entre a voltagem inicial e a voltagem residual medida em campo, obtendo a capacitância do solo investigado. (MOURA; MALAGUTTI FILHO, 2007).

Quando a corrente elétrica é novamente ligada, a voltagem volta a subir gradativamente, até alcançar o seu valor máximo. E o tempo de ascensão da voltagem é igual ao seu tempo de decréscimo e eles dependem das características do solo analisado (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

Figura 5 – Comportamento do potencial elétrico com a aplicação da polarização induzida



Fonte: KEAREY; BROOKS; HILL, 2009

A polarização induzida pode ser medida de várias maneiras, como: a polarização induzida no domínio do tempo, que mede o decaimento da voltagem em um certo intervalo de tempo, sendo que o parâmetro mais comumente medido é a cargabilidade (M) dada em mV/V ou ms (Equação 5) (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009).

$$M = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (5)$$

Sendo,

M é a cargabilidade

ΔV_c é a diferença de potencial medida do valor estável até zero

$t_2 - t_1$ é a faixa de tempo que ocorre a variação do potencial elétrico.

Outra aplicação, é a polarização induzida no domínio da frequência que está relacionada com a obtenção de medidas de resistividade aparente para, no mínimo, duas frequências distintas e menores que 10Hz, resultando no efeito da frequência, que é a diferença entre a resistividade aparente medida em duas frequências diferentes (Equação 6) (REYNOLDS, 2010).

$$FE = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \quad (6)$$

Sendo,

FE é o efeito da frequência

ρ_1 é a resistividade aparente medida na frequência 1

ρ_2 é a resistividade aparente medida na frequência 2.

2.10.2 Eletrorresistividade

A eletrorresistividade é um método geoeletrico e seu princípio de funcionamento consiste na injeção de corrente elétrica contínua ou alternada no solo, resultando em uma diferença de potencial que é medida por meio de eletrodos. A partir das relações entre a corrente elétrica e da diferença de potencial é possível obter a resistividade de uma subsuperfície (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; SAMOUËLIAN *et al.*, 2005).

A resistividade elétrica é uma propriedade física associada com a passagem de corrente elétrica em uma substância ou material, resultando em um valor específico expresso em unidade de resistência elétrica multiplicada por unidade de comprimento ($\Omega \cdot m$), (Tabela 3). Esse parâmetro está relacionado as características do solo, ou seja, os valores de resistividade obtidos irão variar de acordo com os constituintes do solo avaliado, como, a distribuição do tamanho das partículas, a mineralogia, a porosidade, a distribuição de tamanho dos poros, o teor de umidade, a concentração de soluto e a temperatura (KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018; MOHAMED; PALEOLOGOS, 2018).

Quando o meio é homogêneo, a resistividade aparente é igual a resistividade verdadeira, se no momento da aplicação da eletrorresistividade os espaçamentos entre os eletrodos forem iguais. Mas o solo é um meio heterogêneo formado a partir de diferentes proporções de partículas sólidas, líquidas e gasosas e conseqüentemente a sua resistividade aparente é dada pelas médias das resistividades dos materiais que o constitui (MOSTAFA; ANWAR; RADWAN, 2018).

O método da eletrorresistividade possui várias técnicas que possibilitam a aquisição de dados, como a tomografia elétrica (ERT), a sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico. Elas são utilizadas para diferentes aplicações como, a investigação em diferentes profundidades, ou uma variação pontual da resistividade ou para obter diferentes valores de resistividade ao longo de uma seção vertical do terreno, respectivamente (LÓPEZ *et al.*, 2008; DE CARLO *et al.*, 2013; PERRI *et al.*, 2018).

Tabela 3 - Resistividade dos materiais
Resistividade dos materiais ($\Omega.m$)

Materiais	Variação da resistividade	
	Mínima	Máxima
Hematita	$3,5 \times 10^{-3}$	10^7
Limonita	10^3	10^7
Magnetita	5×10^{-5}	$5,7 \times 10^3$
Quartzo	3×10^2	10^6
Lignito	9	2×10^2
Antracito	10^{-3}	2×10^5
Granito	3×10^2	$1,3 \times 10^6$
Basalto	10	$1,3 \times 10^7$
Dolomita	$3,5 \times 10^2$	5×10^3
Argila	1	1×10^2
Solo com 40% de argila	8	
Solo com 20 % de argila	$3,3 \times 10^1$	
Rocha seca	$1,4 \times 10^3$	
Rocha saturada	1×10^2	
Areia e argila	3×10^1	$2,15 \times 10^2$
Argila e rocha	3×10^1	$2,25 \times 10^2$
Argila seca	5×10^1	$1,5 \times 10^2$
Água fresca	3	1×10^2
Água salgada	0,3	1
Permafrost	10^3	10^4

Fonte: (REYNOLDS, 2010).

De acordo com Samouëlian *et al.* (2005), a determinação da resistividade elétrica normalmente é feita a partir de quatro eletrodos, dois deles, eletrodos A e B, são utilizados para realizar a injeção a corrente elétrica no meio, e os dois outros, eletrodos M e N, são utilizados para medir a diferença de potencial resultante V_{MN} , dada por:

$$V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (7)$$

Sendo,

V_{MN} é a diferença de potencial medida pelos eletrodos potenciais M e N

ρ é a resistividade elétrica

I é a corrente elétrica

AM é a distância geométrica entre os eletrodos A e M

BM é a distância geométrica entre os eletrodos B e M

AN é a distância geométrica entre os eletrodos A e N

BN é a distância geométrica entre os eletrodos B e N

Com isso, a resistividade elétrica (ρ) é dada por:

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (8)$$

Podendo também ser escrita em função de K, que é o coeficiente geométrico diretamente relacionado com a distância geométrica entre os eletrodos A, B, M e N.

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} K \quad (9)$$

Ou também,

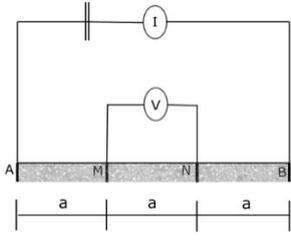
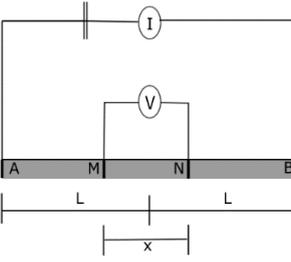
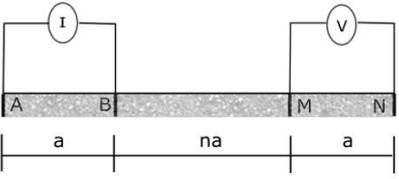
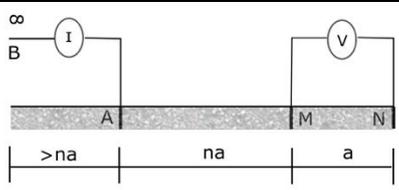
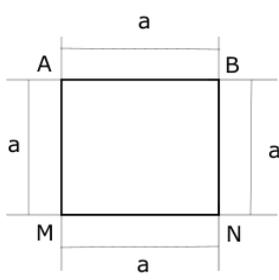
$$\rho = R K \quad (10)$$

R é a resistência elétrica

K é o coeficiente geométrico

Os quatro eletrodos, A, B, M e N podem ser instalados em diferentes posições sobre a superfície de um terreno, sendo que as suas variadas disposições recebem o nome de arranjos. Diferentes arranjos são utilizados em pesquisas de campo e os mais comuns são: Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, polo-dipolo e quadrático, (Tabela 4) (MOHAMED; PALEOLOGOS, 2018).

Tabela 4 - Tipos de arranjos utilizados em medições utilizando a eletrorresistividade

Tipos de arranjos utilizados			
Arranjos	Dimensão	Disposição dos eletrodos	ρ
Wenner	2D		$2\pi aR$
Schlumberger	2D		$\pi \frac{L^2}{x} R \left[1 - \frac{x^2}{4L^2} \right]$ Para $L \geq 5x$
Dipolo-dipolo	2D		$n\pi(n+1)(n+2)aR$
Polo-dipolo	2D		$2n\pi(n+1)aR$
Quadrático	3D		$(2 + \sqrt{2})\pi aR$

Fonte: (MOHAMED; PALEOLOGOS, 2018)

Cada arranjo possui uma disposição diferente dos seus eletrodos de corrente e de potencial elétrico, resultando em uma apresentação de distintas características, tendo em vista que existem vantagens e desvantagens na utilização de um tipo de arranjo em detrimento aos outros. Então, a escolha da configuração dos eletrodos está diretamente relacionada com as características que se deseja obter. Portanto, para a investigação em grandes profundidades, o mais utilizado é o Dipolo-dipolo

(Tabela 4) e o que apresenta a melhor resolução vertical é o de Wenner, (Tabela 5) (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005).

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens da utilização de cada tipo de configuração dos eletrodos
Vantagens e desvantagens das configurações dos eletrodos

Características	Wenner	Schlumberger	Dipolo-Dipolo
Profundidade de penetração	Baixo	Médio	Alto
Resolução vertical	Alto	Médio	Baixo
Sensibilidade a orientação	Alto	Alto	Médio
Intensidade do sinal	Alto	Médio	Baixo

Fonte: (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005)

2.10.3 Aplicação da eletrorresistividade em laboratório

Para a realização de um experimento em escala laboratorial que tem o objetivo de mensurar a resistividade de uma substância ou material, seja ele uma rocha, um mineral, uma porção de solo ou um eletrólito, é necessário moldar a amostra, sendo que esse molde deve possuir uma forma regular, como um cilindro, um cubo ou um paralelepípedo (REYNOLDS, 2010). Essa resistividade é determinada a partir da lei de Ohm e é dada por:

$$\rho = \frac{V_{MNA}}{IL} \quad (11)$$

Ou seja, a relação entre a área (A) e o comprimento (L) do molde estão associados com a obtenção dos valores resistividade (ρ) e para que a dependência desse molde seja minimizada, é necessário que A/L seja igual a 1 (KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018).

Além de um molde regular, deve ser considerado em um arranjo experimental um bom contato elétrico, principalmente para os elétrodos correntes (A e B). Para isso, pode ser utilizado eletrodos de platina, cobre ou alumínio que preencham toda a extremidade da amostra. O material contido no interior do recipiente deverá ser

pressionado para que haja um contato com o eletrodo corrente e ao mesmo tempo uma compactação da amostra (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

Outro ponto a ser considerado é o fato dos eletrodos de corrente serem colocados nas extremidades dos moldes, com o objetivo de injetarem a corrente elétrica em direções opostas (GUEDES *et al.*, 2008).

2.11 FATORES ANALISADOS EM PESQUISAS EM LABORATÓRIO

Diversos autores têm realizado estudos geofísicos em escala laboratorial, pois esse tipo de pesquisa é útil tanto para verificar as limitações tecnológicas associadas a aquisição de dados, quanto para avaliar o papel de todos os fatores envolvidos na determinação das propriedades elétricas complexas do solo (INZOLI; GIUDICI, 2015).

Devido a isso, cada pesquisa aborda a influência de diferentes variáveis em um solo, Tabela 6, sendo que as principais são: a granulometria, ou seja, a variação da resistividade em função da diferença do tamanho das partículas presentes no solo (MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006; KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018), o teor de umidade (KIM; OH; PARK, 2007; BIAN *et al.*, 2016), a concentração de contaminantes (MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006; KIM; OH; PARK, 2007; ALEGRIA, MARTINHO; ALMEIDA, 2009; LIU; LIU; CAI, 2015; BIAN *et al.*, 2016; KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018) e a variação das características desse contaminante ao longo do tempo (MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006; ALEGRIA, MARTINHO; ALMEIDA, 2009; MARTINHO *et al.*, 2010; LIU; LIU; CAI, 2015; BIAN *et al.*, 2016; KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018).

Tabela 6 - Fatores considerados em pesquisas anteriores realizadas em escala experimental

Fatores considerados em pesquisas anteriores realizadas em escala experimental		Fatores considerados				
Autores	Foco da pesquisa	Granulometria	Teor de umidade	Porosidade	Concentração de poluente	Tempo do contaminante no solo
(MARTINHO <i>et al.</i> , 2010)	Efeitos da biodegradação de uma contaminação de um solo por óleo diesel.			X		X
(MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006)	Comparação da biodegradação do solo para duas granulometrias diferentes	X			X	
(ALEGRIA, MARTINHO; ALMEIDA, 2009)	Comparação de um solo contaminado com óleo diesel e um solo sem contaminação				X	X
(KOLAY; BURRA; KUMAR, 2018).	Influência da contaminação do solo por duodecano	X	X		X	X
(BIAN <i>et al.</i> , 2016)	Influência da contaminação do solo por óleo diesel ao longo do tempo		X		X	X
(KIM; OH; PARK, 2007)	Influência da contaminação do óleo diesel em um solo arenoso		X		X	
(LIU; LIU; CAI, 2015)	Influência da contaminação do óleo diesel em um solo argiloso				X	X

Fonte: Autor

2.11.1 Granulometria

Martinho, Almeida e Matias (2006), utilizaram granulometrias < 2mm e < 1mm, foi mostra que a variação do tamanho dos grãos do solo não produz alterações

relevantes na cargabilidade [mV/V], que é resposta da aplicação da polarização induzida.

Foram elaboradas amostras de granulometria de solo <2mm e concentrações de gasolina de 0%, 7%, 14% e 21% e granulometria de solo < 1mm e concentrações de gasolina de 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%. A amostra com maior resistividade foi a que considerou granulometria < 2mm e concentração de gasolina de 21% e a amostra com menor resistividade foi a que considerou granulometria < 1mm e concentração de gasolina de 0%. Podendo concluir que o aumento da resistividade está diretamente relacionado com o aumento do tamanho dos grãos e da concentração do contaminante.

2.11.2 Concentração do contaminante

Alegria, Martinho e Almeida (2009) compararam uma amostra contaminada, contendo 72% de solo, 21% de água e 7% de óleo diesel e uma amostra não contaminada contendo 72% de solo e 28% de água. Após a realização dos experimentos, foi verificado que a adição do óleo diesel aumentou os valores de resistividade e cargabilidade. O aumento da resistividade justificado pelo fato do óleo diesel possuir resistividades maiores que a água e o ar, que antes ocupavam os poros do solo. Já o aumento da cargabilidade pode estar relacionado com a desagregação do solo causada pela adição de contaminante, pois o efeito da polarização induzida é maior em sedimentos que têm partículas de argila disseminadas em comparação com sedimentos com argilas compactadas.

Martinho, Almeida e Matias (2006) também analisam a resposta para de diferentes contaminantes, como o tolueno, a gasolina, o isopropeno e o benzeno e suas diferentes concentrações (0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%). Em relação a cargabilidade, todos os solos ao serem contaminados possuíram a redução desse parâmetro. Entretanto, à medida que a concentração dos contaminantes ultrapassou os 10%, houve um aumento da cargabilidade. Por outro lado, o aumento da resistividade é proporcional ao aumento concentração do contaminante.

Liu, Liu e Cai (2015) utilizaram o método da eletrorresistividade em um solo argiloso contaminado com óleo diesel. Primeiramente, o solo foi seco, para a retirada da sua umidade natural. Para a elaboração das amostras foi considerado um teor de umidade fixo de 10% e concentração de óleo diesel de 0%, 4%, 8%, 12%, 16% e

20%. E foi verificada um aumento da resistividade do solo a partir do aumento da concentração do contaminante.

Kolay, Burra e Kumar (2018) também utilizaram apenas o método da eletrorresistividade para obter a resistividade elétrica de um solo contaminado com duodecano. Os autores realizam uma variação do teor de duodecano de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Pôde-se notar que o aumento da concentração de duodecano, foi diretamente proporcional ao aumento da resistividade.

Analisando os resultados obtidos por essas pesquisas, é possível concluir que o aumento da concentração de substâncias compostas por hidrocarbonetos (óleo diesel, Duodecano, Benzeno, Isopropeno, gasolina e Tolueno) no solo, aumentam a sua resistividade. Já o aumento da cargabilidade está relacionada com a concentrações do contaminante, visto que ele só foi evidenciado em concentrações superiores a 10%.

2.11.3 Teor de umidade

Bian *et al.* (2016) utilizaram o método da eletrorresistividade para avaliar um solo contaminado com óleo diesel. Sendo que os autores mantiveram o teor de óleo diesel fixo e variaram o teor de umidade do solo. Com base nos resultados os autores concluíram que a adição de água reduziu a resistividade do solo, sendo que essa redução foi mais rápida em amostras com menores teores de umidade.

2.11.4 Tempo de permanência do contaminante no solo

Liu, Liu e Cai (2015) verificaram um aumento da resistividade do solo a partir do aumento da concentração do contaminante, justificado pelo fato da resistividade do óleo diesel possuir resistividades elevadas. Os autores também fazem uma análise da persistência do contaminante no solo durante os períodos de 7, 14, 28, 120 e 210 dias. Concluíram que após os 120 dias a resistividade do solo contaminado torna-se muito baixa, em virtude da biodegradação do combustível.

Alegria, Martinho e Almeida (2009) também relacionam a queda da resistividade do solo a biodegradação do contaminante. Eles verificaram que a adição do óleo diesel aumentou os valores de resistividade, sendo que isso era esperado porque o diesel tem resistividade mais elevada do que a água. Foi observado também uma diminuição na resistividade do solo entre 4 e 8 meses que está relacionada com

a biodegradação do diesel. A partir de 8 meses de análise, os valores de resistividade permaneceram relativamente constantes, podendo ser justificado por uma diminuição na taxa de degradação do diesel. Em relação a cargabilidade, os valores obtidos durante os quatro primeiros meses de análise não foram registrados, pois as medidas foram difíceis de obter devido à instabilidade do sistema.

Martinho *et al.* (2010) avaliaram a variação da resistividade do solo contaminado com óleo diesel ao longo do tempo. E os autores além de associarem a redução da resistividade observada entre 4 e 12 meses de análise com a biodegradação do contaminante, também relacionaram com alterações na tortuosidade e porosidade, visto que de 0 a 12 meses ocorreu uma diminuição de 15% na sua porosidade.

Bian *et al.* (2016) analisaram o comportamento granulométrico em relação ao tempo de permanência do óleo diesel. E foi verificado que a porcentagem de partículas finas (<0,005mm), em um solo com teor de contaminação de 4%, era de 13,4% após 14 dias de permanência, 15,3% após 28 dias e 26% após 56 dias. Ou seja, ocorreu um aumento das partículas finas, com o aumento do tempo que o contaminante permanece no solo.

2.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Análise de Variância (ANOVA) é uma ferramenta estatística utilizada para comparar as diferentes amostras ou estratos de interesse. A partir da utilização dessa técnica é possível analisar a existência de diferenças significativas entre os grupos pesquisados. As conclusões obtidas a partir desse método apresentam um nível de confiança que será determinado pelo autor do estudo (PAESE; CATEN; RIBEIRO, 2001; CHENG *et al.*, 2019).

No presente estudo a utilização da ANOVA tem como objetivo conhecer quais fatores ou combinação de fatores possuem maior influência na variação da resistividade em um solo contaminado com óleo diesel. Os quatro fatores avaliados foram: a granulometria e o teor de umidade do solo, a concentração de óleo diesel e o tempo de persistência desse contaminante no solo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão descritos os materiais e os métodos de abordagem e procedimentos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa são:

- Solo;
- Norma ABNT NBR 6502/1995;
- Norma ABNT NBR 6457/2016;
- Norma ABNT NBR 7181/2016;
- Norma ABNT NBR 7182/2016;
- Peneira de malha de 4,8 mm;
- Peneira de malha de 2,0 mm;
- Peneira de malha de 0,06 mm;
- Água da chuva;
- Óleo diesel S500;
- Bombonas de plástico de 50 litros;
- Cano PVC de 1.1/2”;
- Disco de cobre de 1.1/2”;
- Varetas de cobre;
- Soquete de aço inox;
- Suporte de madeira e cano PVC;
- Régua de 50 cm;
- Medidor de pH da marca *Ideepen*;
- Medidor de umidade do solo ECOWITT;
- Medidor de resistividade *Lippmann* e modelo *4 point light 10 W*.

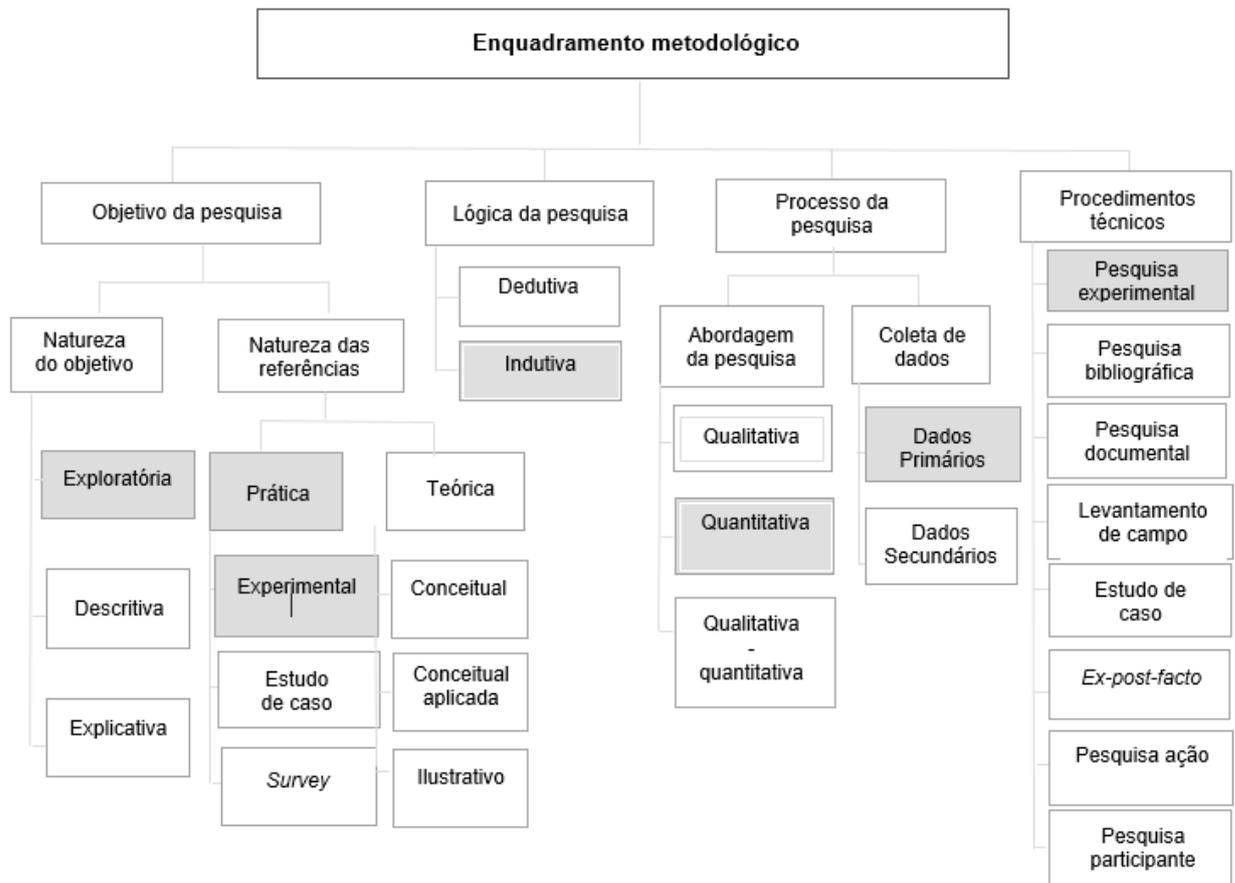
3.2. MÉTODO DE ABORDAGEM

Os métodos de abordagem tem como o objetivo esclarecer os procedimentos lógicos que deverão ser seguidos no processo de pesquisa científica, possibilitando a decisão sobre o alcance desejado da investigação e das regras de explicação dos fatos (PRODANOV; FREITAS, 2013). Dessa forma, o enquadramento metodológico tem como objetivo descrever os métodos de abordagem desta pesquisa (Figura 6).

Em relação a natureza do objetivo, esta pesquisa teve caráter exploratório, pois buscou analisar, de forma detalhada, a relação entre a resistividade do solo e diferentes parâmetros, como, granulometria, teor de umidade, concentração do contaminante e tempo de permanência do contaminante no solo. E pela perspectiva da natureza das referências, este estudo é considerado prático/experimental. Ao analisar a lógica da pesquisa, tem-se um estudo de características indutivas (GIL, 2002; TASCA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2013).

O processo da pesquisa, que está relacionado com a coleta dos dados, foi de natureza primária, ou seja, os dados foram obtidos por meio de experimentos realizados em laboratório. Já a abordagem do problema, caracteriza-se como quantitativa, pois foram realizadas coletas de dados numéricos de resistividade do solo (TASCA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2013).

Figura 6 – Enquadramento metodológico

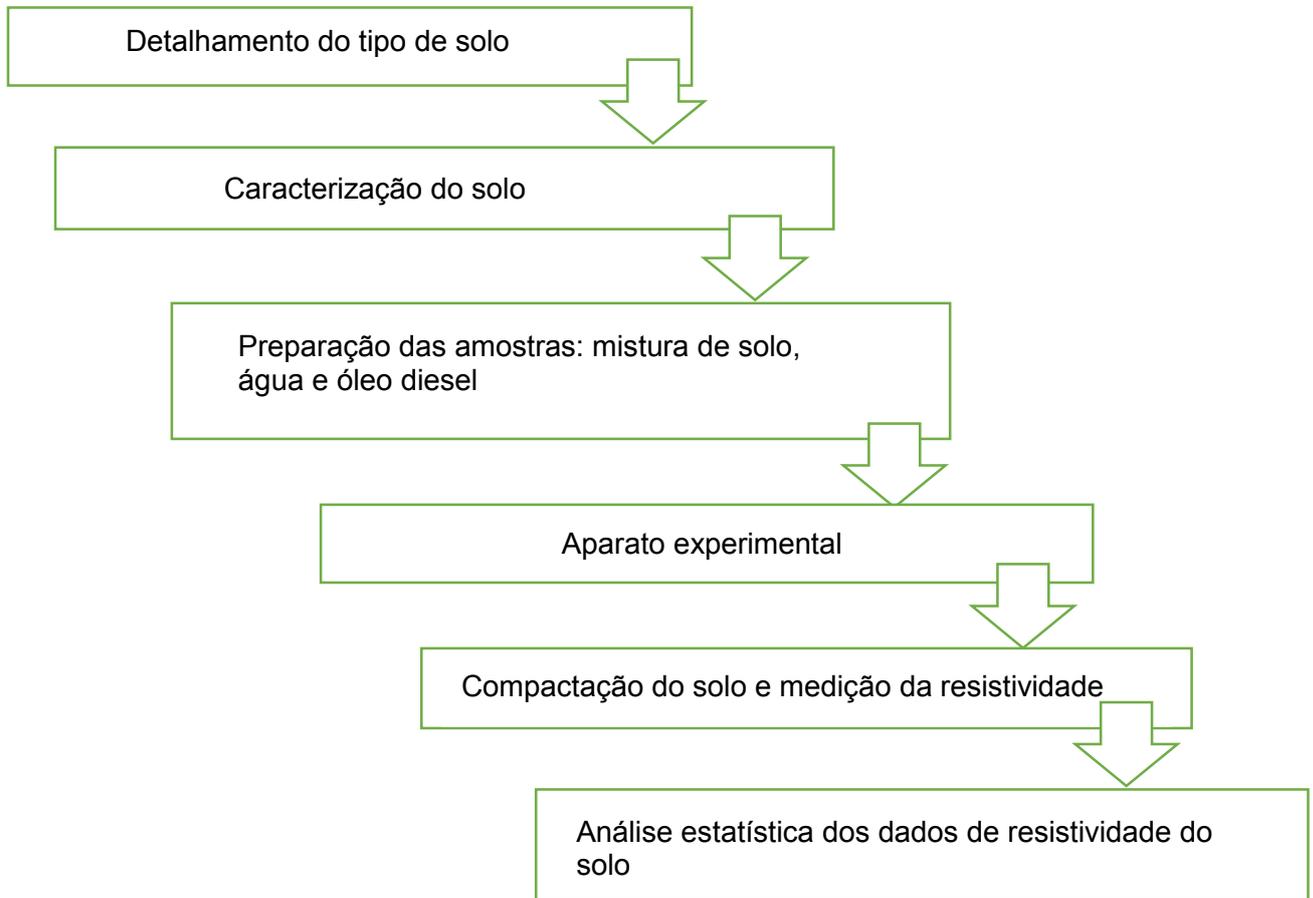


Fonte: adaptado de (TASCA; ENSSLIN; ENSSLIN, 2013).

3.3. MÉTODO DE PROCEDIMENTOS

Os métodos de procedimentos são as etapas realizadas durante a pesquisa (PRODANOV; FREITAS, 2013). Este item consiste nos métodos de procedimentos que foram adotados para alcance dos objetivos específicos deste estudo (Figura 7).

Figura 7 – Detalhamentos das etapas do método de procedimentos



Fonte: Autor

3.3.1. Tipo de solo

O local escolhido para a coleta do solo que foi utilizado neste estudo se encontra em Nova Lima, município de Minas Gerais (Brasil), latitude $20^{\circ} 03' 47''$ S e longitude $43^{\circ} 48' 30''$ W. Esse município pertence a região metropolitana de Belo Horizonte – MG e está inserido no Quadrilátero Ferrífero. O Quadrilátero Ferrífero, está localizado na porção central de Minas Gerais e se destaca por sua grande produção mineral. Essa região abriga minerações de ferro, ouro, topázio e bauxita (MARENT, 2011; SCHLOSSER, 2017).

O tipo de solo coletado, foi o Latossolo Vermelho Perférico típico. O latossolo foi escolhido, pois, é o tipo de solo dominante e encontra-se amplamente distribuído por todo o território nacional, ocupando cerca de um terço do território brasileiro e ocorrendo praticamente em todas regiões do país sob diferentes condições climáticas (KER, 1998). E para a realização deste estudo foram coletadas amostras entre as

profundidades de 0,5 a 1,0 metros. No solo escolhido não existiam indícios da existência de fragmentos da rocha mãe, ou seja, é um solo residual maduro (VAZ, 1996).

3.3.2. Caracterização do solo

O solo a ser estudado foi inicialmente caracterizado em: i) granulometria, pelo ensaio de granulometria (ABNT NBR 7181,2016b); ii) massa específica dos grãos do solo e massa específica aparente, que será utilizada para a determinação da sua porosidade (ABNT NBR 6457,2016a) e iii) teor de umidade (ABNT NBR 6457, 2016a).

Para a obtenção da massa específica dos grãos do solo foi utilizado o método do picnômetro. Ela é expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3) e foi calculada a partir da (Equação 12):

$$M_{gs} = \frac{M_1 \times \frac{100}{100 + W}}{\left(M_1 \times \frac{100}{100 + W}\right) + M_3 - M_2} \times M_{espW} \quad (12)$$

onde, M_{gs} é a massa específica dos grãos do solo (g/cm^3), M_1 a massa do solo úmido (g), M_2 a massa do picnômetro com solo e água à temperatura T do ensaio (g), M_3 a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência à temperatura T de ensaio (g) e W é a umidade inicial da amostra (%) e M_{espW} – Massa específica da água (g/cm^3).

Para a obtenção da massa específica aparente foi aplicado o método do cilindro volumétrico, de volume interno de $50,24 \text{ cm}^3$. Ela é expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3) e foi calculada a partir da (Equação 13):

$$M_{ap} = \frac{M_s}{V} \quad (13)$$

onde, M_s é massa do solo seco (g) e V é o volume do cilindro de PVC (cm^3).

Para o cálculo da porosidade do solo foi utilizada uma relação entre a massa específica dos grãos e a massa específica aparente, dada pela Equação 14 (FIORI; CARMIGNANI, 2009):

$$p = \frac{M_{gs} - M_{ap}}{M_{gs}} \times 100 \quad (14)$$

Em seguida, foi feita a separação do solo em duas granulometrias diferentes: i) granulometria 1: entre 2 mm e 0,06mm e iii) granulometria 2: menores que 0,06 mm (Figura 8).

Figura 8 – Amostras de solo separado em duas granulometrias: a) Granulometria 1 b) Granulometria 2



Fonte: Autor

3.3.3. Preparação dos cenários

Após a caracterização física e química do solo, água da chuva e óleo diesel S500 foram adicionadas aos solos (granulometria 1 e granulometria 2).

A escolha da água da chuva ocorreu para reproduzir as características semelhantes as encontradas em solos naturais expostos a intempéries, entre essas as chuvas. Estudos indicam que o pH médio da água pluviais é em torno de 5,6 (CUNHA *et al.*, 2009). A água da chuva foi captada no município de Belo Horizonte (MG), durante o mês de janeiro. A medição do pH dessa água foi realizada após a sua coleta e antes do começo dos experimentos (Tabela 7), uma vez a água da chuva ficou armazenada entre os meses de janeiro (coleta) e março (preparação das misturas solo com água e diesel) (Figura 9b). Para a realização dessa medição, foi utilizado o pHmetro da marca *Ideepen*, que possui uma precisão de $\pm 0,01$ (Figura 9a).

Já o óleo diesel escolhido foi o S500, que possui a quantidade de enxofre de 500 partes por milhão (ppm). Esse combustível é amplamente utilizado em diferentes setores, como, o rodoviário, agrícola, marítimo e industrial (RANZAN, 2014).

Antes da água da chuva e do óleo diesel S500 serem adicionados, a umidade natural do solo foi reduzida e para isso foi feita a secagem do solo na sombra durante 15 dias. Após a secagem, a umidade do solo não foi totalmente reduzida. O teor de umidade residual do solo foi então estimado por meio do método da estufa (Figura 10a), de forma que a quantidade de água da chuva adicionada ao solo (quantidade de água ajustada) junto com a umidade residual fornecesse a umidade final pretendida (Tabela 8).

Depois de seco, foi adicionado ao solo uma mistura variada de água da chuva e óleo diesel S500 (Tabela 8). A adição de água e óleo diesel foi realizada proporcionalmente ao peso de solo seco (Tabela 8), sendo que todas as misturas foram feitas a partir de uma quantidade inicial de 2,5 kg de solo. Dezoito misturas contendo solo, água e óleo diesel foram obtidas: 1) duas granulometrias de diferentes: entre 2 mm e 0,06mm (granulometria 1) e menores que 0,06mm (granulometria 2) três porcentagens de óleo diesel: 0%, 5% e 10%; e 3) três porcentagens de água: 30%, 40% e 50% (Tabela 8).

De acordo com Reis (2009), para que haja uma biodegradação ótima do contaminante, os teores de umidade do solo devem estar entre 50% a 80% da capacidade de campo do solo. Para solos argilosos, como o latossolo vermelho perférico, a capacidade de campo é em torno de 40,1% e os teores de umidade ótimos para esse tipo de solo variam entre 20,05% e 32,08% (ANDRADE; STONE, 2010). Devido a isso o teor de umidade de 30% foi escolhido para ser utilizado na presente pesquisa, pois está dentro da faixa ótima de biodegradação do contaminante de acordo com (ANDRADE; STONE, 2010). Os teores de umidade de 40% e 50% também foram escolhidos, pois estão fora da faixa ótima de biodegradação do contaminante e serão comparados com os resultados obtidos nos cenários com teores de umidade de 30%.

As misturas foram em seguida armazenadas em bombonas de 50 litros hermeticamente vedadas (Figura 11), para evitar que mudanças das características

do contaminante. Essa mistura foi homogeneizada manualmente, durante 10 minutos, antes e depois de todas as medições geofísicas.

Durante sete meses (março a setembro de 2020), o material foi retirado das bombonas, compactados e avaliados por meio da eletrorresistividade nos aparatos experimentais. Em seguida, a mistura de solo, água e diesel era retornada para as bombonas e novamente homogeneizado com o restante do material não testado. Após os testes laboratoriais de medição de resistividade era realizada a medição do teor de umidade da amostra, pelo método da estufa (Figura 10a) e pelo medidor de umidade ECOWITT (Figura 10b), de forma a identificar a quantidade de água que foi perdida para o ambiente.

Tabela 7 – PH da água da chuva

Momento da medição do PH	Valor do PH
Após a captação	5,92
Antes dos ensaios	5,63

Fonte: Autor

Tabela 8 – Granulometrias, teor de água e concentração do contaminante estudados

Granulometria do solo	Teor de água (%)	Concentração de contaminante (%)	Quantidade do solo (Kg)	Quantidade de água (kg)	Quantidade de Diesel (Kg)	Teor de água residual do solo (%)	Quantidade de água ajustada (kg)
Granulometria 1	30	0	2,5	0,75	0,00	2,27	0,727
Granulometria 1	40	0	2,5	1,00	0,00	2,27	0,977
Granulometria 1	50	0	2,5	1,25	0,00	2,27	1,227
Granulometria 1	30	5	2,5	0,75	0,125	2,27	0,727
Granulometria 1	40	5	2,5	1,00	0,125	2,27	0,977
Granulometria 1	50	5	2,5	1,25	0,125	2,27	1,227
Granulometria 1	30	10	2,5	0,75	0,250	2,27	0,727
Granulometria 1	40	10	2,5	1,00	0,250	2,27	0,977
Granulometria 1	50	10	2,5	1,25	0,250	2,27	1,227
Granulometria 2	30	0	2,5	0,75	0,00	2,22	0,728
Granulometria 2	40	0	2,5	1,00	0,00	2,22	0,978
Granulometria 2	50	0	2,5	1,25	0,00	2,22	1,228
Granulometria 2	30	5	2,5	0,75	0,125	2,22	0,728
Granulometria 2	40	5	2,5	1,00	0,125	2,22	0,978
Granulometria 2	50	5	2,5	1,25	0,125	2,22	1,228
Granulometria 2	30	10	2,5	0,75	0,250	2,22	0,728
Granulometria 2	40	10	2,5	1,00	0,250	2,22	0,978
Granulometria 2	50	10	2,5	1,25	0,250	2,22	1,228

Granulometria 1 - Entre 2mm e 0,06mm; Granulometria 2- Menor que 0,06 mm.

Fonte: Autor

Figura 9 – PHmetro: a) Aparelho *IdeePen* b) Realização da medição

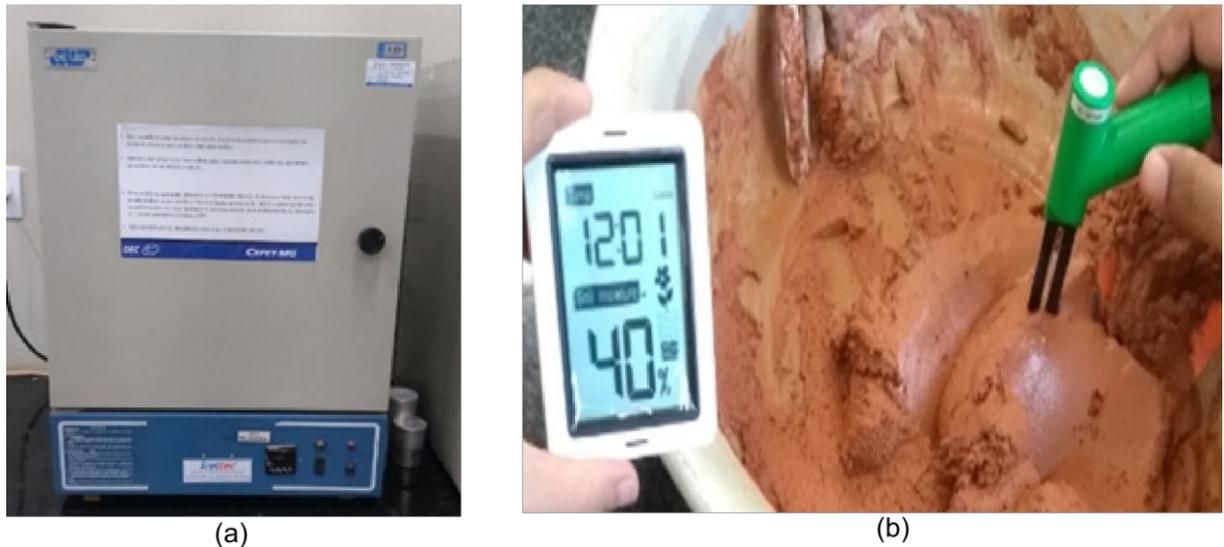


(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 10 – Medição do teor de umidade: a) Estufa b) Medidor ECOWITT



Fonte: Autor

Figura 11 – Bombona utilizada no armazenamento do solo contaminado



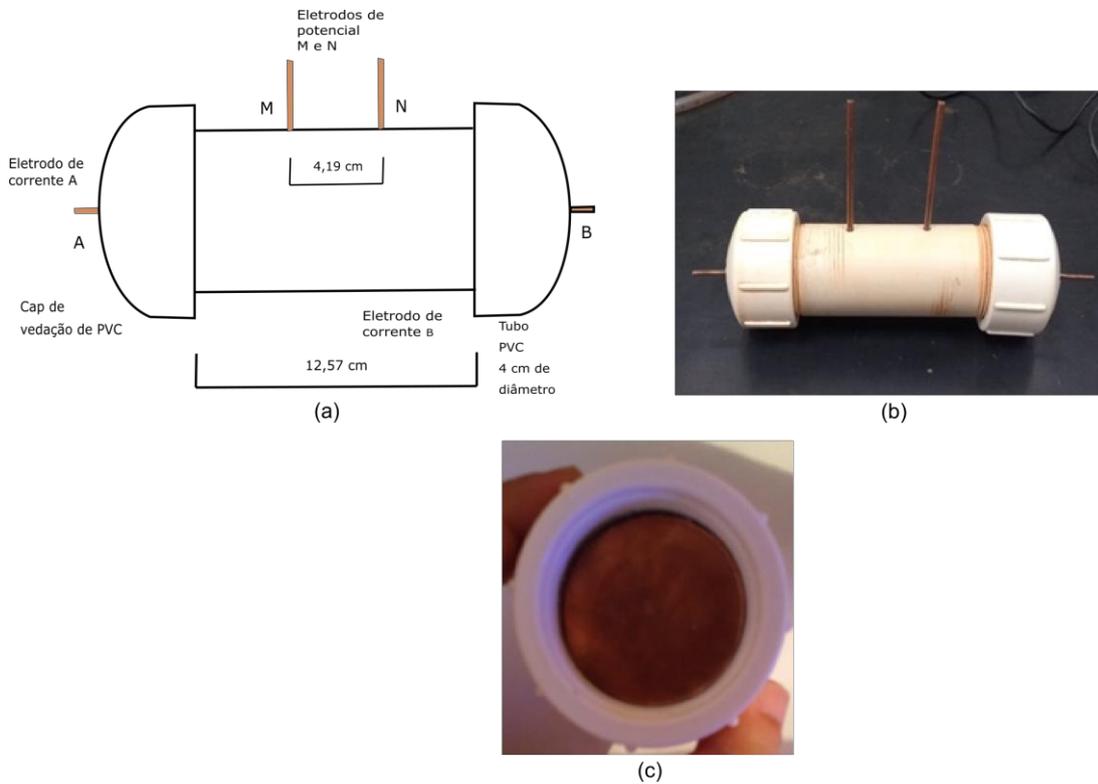
Fonte: Autor

3.3.4. Aparato experimental

O aparato experimental elaborado possui o corpo de PVC, em formato cilíndrico e dimensões de 12,57 cm de altura e 4 cm de diâmetro (Figura 12a) e (Figura 12b), mantendo a relação A/L (ÁREA/COMPRIMENTO) igual a 1 (ABU-HASSANEIN; BENSON; BLOTZ, 1996). Eles foram fechados com dois caps rosca de PVC que possuem no seu interior dois discos de cobre (Figura 12c), que funcionaram como eletrodos de corrente A e B (injeção de corrente elétrica). Duas entradas para os eletrodos de medição de potencial elétrico M e N, feitos à base de cobre puro, foram produzidas na lateral do cilindro de PVC, com uma distância de 4,19 cm entre elas (Figura 12a). Foram produzidos 5 aparatos experimentais de forma a ter 5 repetições

de medição de resistividade por cenário (combinação de granulometria, diesel e água).

Figura 12 – Aparato experimental a) Escala e componentes do aparato experimental b) Imagem do aparato experimental c) Eletrodo de corrente no interior do cap



Fonte: Autor

3.3.5. Compactação do solo

A preparação do solo para medição da resistividade em cada uma das 18 misturas envolveu a compactação dessas nos aparatos experimentais por meio de compactação. Esse processo utilizou um soquete (Figura 13a), adaptado do ensaio de compactação do solo (ABNT, 2016c).

A mistura de solo contaminado foi adicionada ao aparato experimental por camadas (3) contendo a mesma quantidade de material (essa quantidade foi em torno de 105 a 120 gramas de solo contaminado, variando de acordo com a composição da amostra). Após uma camada de solo ser adicionada ao aparato experimental, esse aparato foi colocado em um suporte feito à base de madeira e conexões de PVC para ser compactado (Figura 13b). A compactação de cada camada foi feita por um soquete de aço inoxidável de 24,2 centímetros de altura, 3,7 centímetros de diâmetro e peso de 2,249 Kg, lançado de uma altura de 5 centímetros, por 25 vezes (Tabela 9). Esse

processo era repetido por mais duas vezes até o preenchimento completo aparato experimental pela mistura.

Os 5 aparatos experimentais foram pesados vazios e cheios e os seus volumes foram calculados, com o objetivo de monitorar a densidade do solo presente no interior de cada um deles.

Tabela 9 – Descrição do soquete e da compactação do solo

Altura do soquete	24,2 centímetros
Diâmetro do soquete	3,7 centímetros
Peso do soquete	2,249 Kg
Material do soquete	Aço inoxidável
Altura de queda do soquete	5 centímetros
Número de batidas por camada	25 batidas
Quantidade de camadas	3 camadas

Fonte: Autor

Figura 13– Compactação do solo a) Soquete b) Suporte para a compactação



(a)



(b)

Fonte: Autor

3.3.6 Medição da resistividade

A medição da resistividade foi feita utilizando o aparelho de eletrorresistividade da marca *Lippmann* e modelo *4 point light 10 W* (Figura 14). A frequência da corrente elétrica utilizada foi a de 5 Hz, sugerida pelo manual do aparelho. O arranjo dos eletrodos utilizado foi do tipo Schlumberger (Tabela 10).

As medições de resistividade (Figura 15a e Figura 15b) foram repetidas, mensalmente, durante um período de 7 meses (de março a setembro de 2020). O objetivo foi de avaliar o comportamento do óleo diesel em diferentes tempos de permanência do contaminante no solo, tendo em vista que a biodegradação desse

combustível quando em contato com o solo provoca diversas alterações na sua resistividade.

Foram realizadas 5 réplicas de cada ensaio por aparato experimental, totalizando 25 medições por cenário (combinação de granulometria, água, diesel por tempo).

Tabela 10 – Descrição do ensaio de eletrorresistividade

Método geofísico	Eletrorresistividade
Aparelho	<i>4 point light 10 W</i>
Frequência da corrente elétrica	5 Hz
Arranjo	Schlumberger
Número de aparatos	5
Número de medições	5

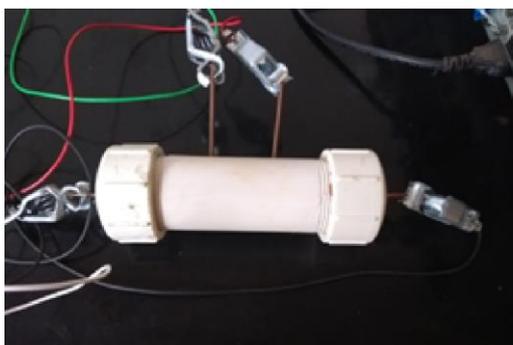
Fonte: Autor

Figura 14- Equipamento utilizado para as medições de eletrorresistividade



Fonte: Autor

Figura 15- Medição da resistividade a) aparato experimental b) *4 point light 10 W*



(a)



(b)

Fonte: Autor

3.3.7 Análise estatística

Para a realização da análise estatística, foi utilizada a ferramenta análise de variância fatorial (ANOVA) e a análise de variância pareada (ANOVA pareada). Os fatores granulometria, teor de umidade, concentração do contaminante e o tempo de permanência do contaminante do solo foram utilizados para avaliar os efeitos na variável resposta resistividade (variável Y). Foram realizados no total 3150 testes, utilizando 18 misturas, cinco aparatos experimentais e cinco réplicas por aparato, durante um período de 7 meses (Tabela 11).

Os testes de ANOVA foram realizados para avaliar o efeito dos fatores granulometria, teor de umidade e concentração do contaminante em cada mês (totalizando 7 ANOVAs). Para avaliação do efeito do tempo combinado com os demais fatores, foi conduzida uma ANOVA pareada utilizando os 3150 dados.

O teste de Tukey foi utilizado para avaliar a hipótese de diferença entre os diferentes cenários (combinação de granulometria, água e diesel) para cada mês. O teste de Wilcoxon pareado avaliou a hipótese de diferença entre distribuição das amostras mensais de um mesmo cenário (combinação de granulometria, água e diesel).

A maioria dos dados apresentaram distribuição normal, pelo teste de Shapiro Wilk, o que justifica a aplicação de testes paramétricos. Os pressupostos de normalidade e aleatoriedade dos resíduos foram avaliados para todos os testes de análise de variância (ANOVA e ANOVA pareada).

Tabela 11 – Configuração dos fatores e número de réplicas

Cenário	Granulometria do solo	Teor de umidade	Concentração de contaminante	Tempo (meses)	Número de réplicas
Cenário 1	Granulometria 1	30%	0%	7	5
Cenário 2	Granulometria 1	40%	0%	7	5
Cenário 3	Granulometria 1	50%	0%	7	5
Cenário 4	Granulometria 1	30%	5%	7	5
Cenário 5	Granulometria 1	40%	5%	7	5
Cenário 6	Granulometria 1	50%	5%	7	5
Cenário 7	Granulometria 1	30%	10%	7	5
Cenário 8	Granulometria 1	40%	10%	7	5
Cenário 9	Granulometria 1	50%	10%	7	5
Cenário 10	Granulometria 2	30%	0%	7	5
Cenário 11	Granulometria 2	40%	0%	7	5
Cenário 12	Granulometria 2	50%	0%	7	5
Cenário 13	Granulometria 2	30%	5%	7	5
Cenário 14	Granulometria 2	40%	5%	7	5
Cenário 15	Granulometria 2	50%	5%	7	5
Cenário 16	Granulometria 2	30%	10%	7	5
Cenário 17	Granulometria 2	40%	10%	7	5
Cenário 18	Granulometria 2	50%	10%	7	5

Granulometria 1 - Entre 2mm e 0,06mm; Granulometria 2- Menor que 0,06 mm.

Fonte: Autor

O *software* utilizado foi o R-3.6.0, que utiliza a linguagem para estatística computacional R. Todas as análises foram consideradas significativas quando o *p-valor* foi menor que 5% (rejeição da hipótese nula do respectivo teste).

4. RESULTADOS

4.1 PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO

O solo utilizado na presente pesquisa possui, classe textural argilo-arenosa (Tabela 13 e Figura 16). E o seu pH medido em água o caracteriza como um solo ácido (Tabela 12).

Tabela 12 – Parâmetros do solo

Massa específica dos grãos do solo (g/cm ³)	3,04
Massa específica aparente (g/cm ³)	1,16
Porosidade (%)	61,8
pH (H ₂ O)	5,13

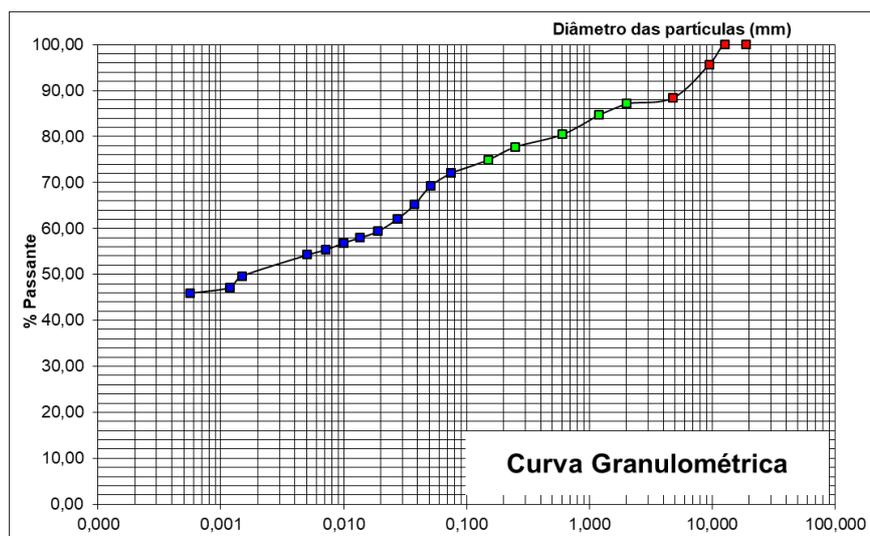
Fonte: Autor

Tabela 13 – Textura do solo

Areia (%)	29,5
Silte (%)	19,3
Argila (%)	51,2

Fonte: Autor

Figura 16 – Curva granulométrica



Legenda:

■ Peneiramento fino ■ Peneiramento grosso ■ Sedimentação

Fonte: Autor

4.2 NORMALIDADE

Grande parte dos dados seguiram distribuição normal (Tabela 14) e dessa forma, as ferramentas paramétricas ANOVA e ANOVA pareada foram utilizadas nas análises da influência dos fatores granulometria, teor de umidade, concentração de diesel e tempo.

Tabela 14: Teste de normalidade para todos os dados coletados. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = amostra provém de uma população normal.

Combinação de fatores			P valor						
			Mês						
			1	2	3	4	5	6	7
G1	30%	0%	0,213	0,344	0,035	0,011	0,074	0,251	0,297
G1	40%	0%	0,174	0,009	0,154	0,037	0,013	0,203	0,263
G1	50%	0%	0,661	0,108	<0,05	0,100	0,004	0,111	0,022
G1	30%	5%	0,013	0,642	0,337	0,260	0,364	0,547	0,337
G1	40%	5%	0,263	0,025	0,122	0,324	0,065	0,104	0,118
G1	50%	5%	0,248	0,602	0,700	0,273	0,831	0,005	0,377
G1	30%	10%	0,108	0,336	0,034	0,172	0,266	0,252	0,433
G1	40%	10%	0,033	0,126	0,331	0,061	0,138	0,356	0,123
G1	50%	10%	0,058	0,848	0,010	0,222	0,013	0,215	0,022
G2	30%	0%	0,019	0,073	0,429	0,178	0,139	0,055	0,062
G2	40%	0%	<0,05	0,092	0,157	0,034	0,016	0,505	0,084
G2	50%	0%	0,006	0,087	0,922	0,831	0,586	0,421	0,486
G2	30%	5%	0,092	0,007	0,032	0,785	0,251	0,197	0,062
G2	40%	5%	0,001	0,294	0,004	0,300	0,278	0,864	0,076
G2	50%	5%	0,216	0,387	0,830	0,171	0,207	0,010	0,003
G2	30%	10%	0,128	0,352	0,845	0,100	0,071	0,017	0,630
G2	40%	10%	0,955	0,033	0,086	0,544	0,058	0,020	0,287
G2	50%	10%	0,040	0,011	0,053	0,299	0,813	0,128	0,873

Fonte: Autor

4.3 INFLUÊNCIA DOS FATORES GRANULOMETRIA, A CONCENTRAÇÃO DE CONTAMINANTE E A TEOR DE UMIDADE

Os fatores granulometria, a concentração de contaminante e a teor de umidade explicaram significativamente e individualmente a variação da resistividade do solo. A interação entre os fatores, dois a dois e também a combinação dos três fatores, também explicaram significativamente a variação da resistividade do solo. Apenas os dados de resistividade do mês 1 não foram explicados pela interação granulometria e diesel. O aparato experimental (os testes foram conduzidos em 5 aparatos experimentais diferentes) não influenciou os resultados (Tabela 15).

Tabela 15: ANOVA fatorial para análise da influência dos fatores granulometria, concentração de diesel, teor de umidade e aparato experimental. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.

Fatores	P valor da interação						
	Mês						
	1	2	3	4	5	6	7
Granulometria	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Diesel	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Água	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Aparato experimental	0,961	0,965	0,965	0,633	0,720	0,997	0,830
Granulometria/ Diesel	0,290	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Granulometria/ Água	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Granulometria/Água	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Granulometria/Aparato experimental	0,515	0,978	0,978	0,821	0,991	0,975	0,923
Diesel/ Aparato experimental	0,960	0,902	0,902	0,774	0,997	0,998	0,998
Água/ Aparato experimental	0,952	0,999	0,999	0,999	0,989	0,971	0,834
Granulometria /Diesel/água	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Granulometria /Diesel/ Aparato experimental	0,998	0,988	0,988	0,979	0,993	0,998	0,981
Granulometria /água/ Aparato experimental	0,916	0,944	0,944	0,987	0,994	0,986	0,993
Diesel/Água/Aparato experimental	1,000	1,000	1,000	0,982	1,000	0,998	0,996
Granulometria /Diesel/Água/ Aparato experimental	0,957	1,000	1,000	0,999	1,000	0,999	1,000

Fonte: Autor

4.4 INFLUÊNCIA TEMPORAL

A ANOVA pareada indicou que a interação do tempo de análise com todos os demais fatores (dois, três e quatro fatores) explicou significativamente a variação da resistividade do solo (Tabela 16).

Tabela 16: ANOVA pareada para análise da combinação da influência temporal com os demais fatores (granulometria, concentração de diesel, teor de umidade). P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.

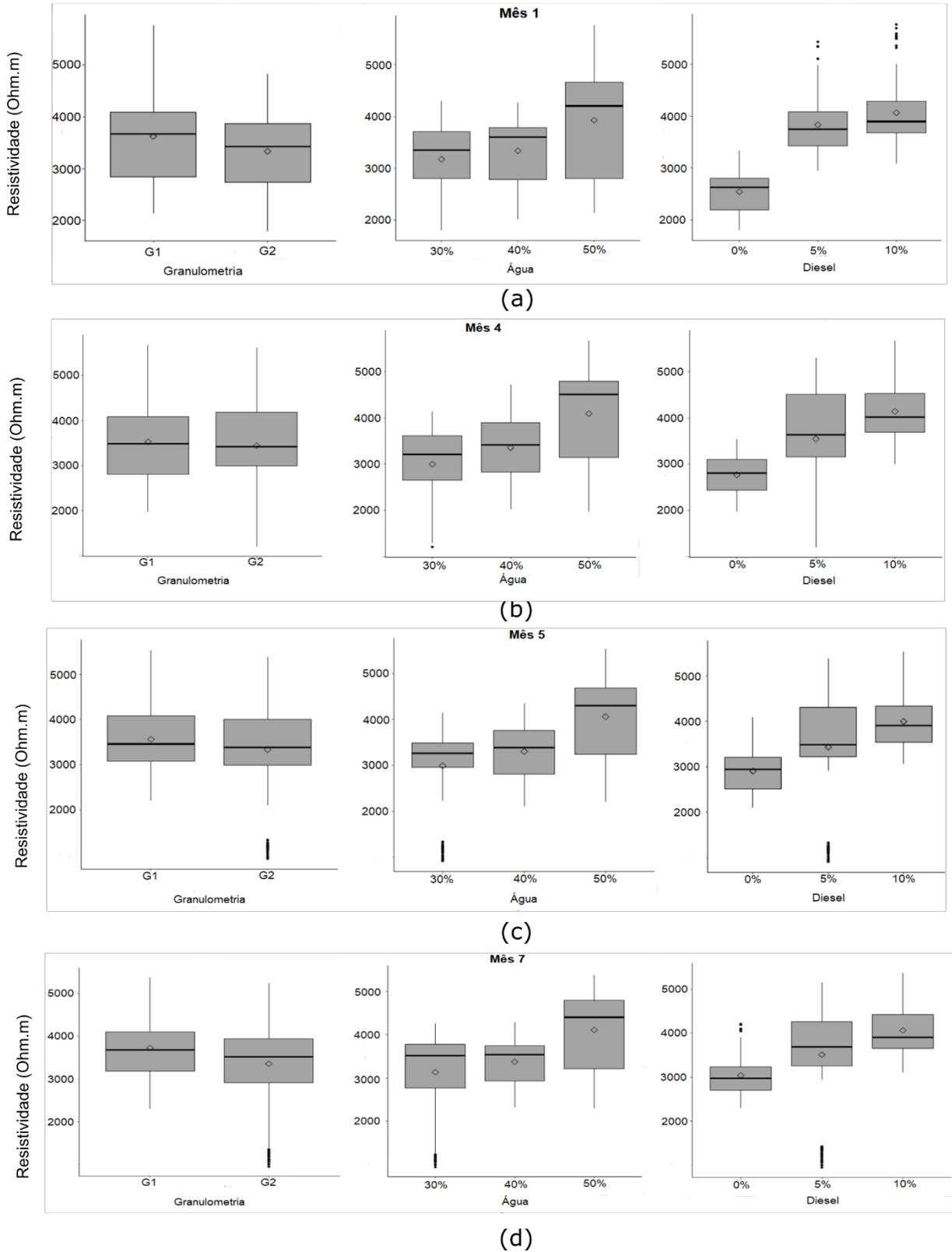
Interação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F valor	P valor da interação
	-				-
Mês	-	-	-	-	-
Mês/água	2	547843240	273921620	408,1	<0,05
Mês/diesel	2	960108656	480054328	74,44	<0,05
Mês/solo	1	32918009	32918009	13,63	<0,05
Mês/água/diesel	4	370992104	92748026	36,68	<0,05
Mês/água/solo	2	77262334	38631167	32,80	<0,05
Mês/diesel/solo	2	78005428	39002714	27,05	<0,05
Mês/água/diesel/solo	4	91032584	22758146	15,53	<0,05

Fonte: Autor

4.5 DIFERENÇA ENTRE OS CENÁRIOS

No geral, os valores de resistividade foram maiores para granulometria G1 do que para granulometria G2, aumentaram com o teor de umidade e com a concentração de diesel (Figura 17a). Esse padrão permaneceu ao longo dos meses, ocorrendo pequenas alterações entre as médias dos cenários de cada fator (Figura 17g). Nas próximas seções serão apresentados os resultados das diferenças entre as médias, avaliadas por meio do teste de Tukey, para os principais meses da análise.

Figura 17 – Boxplots da variação da resistividade influenciada pela granulometria, teor de umidade e concentração do contaminante: a) Mês 1, b) Mês 4, c) Mês 5 e d) Mês 7



Fonte: Autor

4.5.1 Mês 1

O teste de Tukey indicou diferença significativa ($p < 0.05$) entre as granulometrias para sete das nove combinações de fatores teor de umidade e quantidade de diesel testadas (Tabela 17).

Tabela 17– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 1. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor
		Diesel	Água	
G1	G2	0%	30%	<0,05
G1	G2	0%	40%	<0,05
G1	G2	0%	50%	<0,05
G1	G2	5%	30%	<0,05
G1	G2	5%	40%	0,78
G1	G2	5%	50%	<0,05
G1	G2	10%	30%	<0,05
G1	G2	10%	40%	0,99
G1	G2	10%	50%	<0,05

Fonte: Autor

Maiores teores de umidade levaram a um aumento da resistividade no mês 1 e ausência de diferenças significativas entre os cenários de 30%-40% e 30%-50% só foram observadas na granulometria G1 (Tabela 18).

Tabela 18 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% de teor de umidade para o mês 1. P-valor menor 5% indica rejeição de H_0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Diesel	
30%	40%	G1	0%	0,99
30%	40%	G1	5%	1,00
30%	40%	G1	10%	1,00
30%	40%	G2	0%	0,001
30%	40%	G2	5%	<0,05
30%	40%	G2	10%	<0,05
40%	50%	G1	0%	<0,05
40%	50%	G1	5%	<0,05
40%	50%	G1	10%	<0,05
40%	50%	G2	0%	<0,05
40%	50%	G2	5%	<0,05
40%	50%	G2	10%	<0,05
30%	50%	G1	0%	0,14
30%	50%	G1	5%	<0,05
30%	50%	G1	10%	<0,05
30%	50%	G2	0%	<0,05
30%	50%	G2	5%	<0,05
30%	50%	G2	10%	<0,05

Fonte: Autor

O aumento da concentração de contaminante também provocou uma maior resistividade no solo e diferenças significativas foram obtidas para os três cenários desse fator (Tabela 19). Apenas algumas comparações entre os cenários com 5%-10% em diferentes combinações de granulometria G1 e G2 e teor de umidade de 30% e 50% não tiveram médias significativamente diferentes (Tabela 19).

Tabela 19– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 1. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Água	
0%	5%	G1	30%	<0,05
0%	5%	G1	40%	<0,05
0%	5%	G1	50%	<0,05
0%	5%	G2	30%	<0,05
0%	5%	G2	40%	<0,05
0%	5%	G2	50%	<0,05
0%	10%	G1	30%	<0,05
0%	10%	G1	40%	<0,05
0%	10%	G1	50%	<0,05
0%	10%	G2	30%	<0,05
0%	10%	G2	40%	<0,05
0%	10%	G2	50%	<0,05
5%	10%	G1	30%	0,996
5%	10%	G1	40%	<0,05
5%	10%	G1	50%	1,00
5%	10%	G2	30%	0,004
5%	10%	G2	40%	0,032
5%	10%	G2	50%	0,177

Fonte: Autor

Os próximos itens tratarão dos testes de Tukey realizados para analisar as diferenças entre os cenários ocorridos no mês 4 e 5. Esses meses tiveram alterações na tendência de resistividade, como será apresentado no item “Análise da tendência temporal”.

4.5.2 Mês 4

No quarto mês, a comparação entre os cenários de granulometria G1 e G2 indicaram que poucas combinações (quatro do total de nove), dos fatores teor de umidade e concentração de diesel, tiveram diferenças significativas (Tabela 20).

Tabela 20– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 4. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor
		Diesel	Água	
G1	G2	0%	30%	<0,05
G1	G2	0%	40%	0,822
G1	G2	0%	50%	<0,05
G1	G2	5%	30%	<0,05
G1	G2	5%	40%	0,994
G1	G2	5%	50%	1,000
G1	G2	10%	30%	1,000
G1	G2	10%	40%	<0,05
G1	G2	10%	50%	0,131

Fonte: Autor

As comparações entre os teores de umidade apresentaram pouca diferença ao mês 1. Uma combinação de fatores que possuíam diferenças significativas passou a não ter (G1-10%) e duas combinações que não eram diferentes no mês 1 passaram a ser (G2-0% e G1 -10%) (Tabela 21).

Tabela 21 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% de teor de umidade para o mês 4. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Diesel	
30%	40%	G1	0%	0,612
30%	40%	G1	5%	0,915
30%	40%	G1	10%	<0,05
30%	40%	G2	0%	<0,05
30%	40%	G2	5%	<0,05
30%	40%	G2	10%	<0,05
40%	50%	G1	0%	0,994
40%	50%	G1	5%	<0,05
40%	50%	G1	10%	<0,05
40%	50%	G2	0%	<0,05
40%	50%	G2	5%	<0,05
40%	50%	G2	10%	<0,05
30%	50%	G1	0%	0,554
30%	50%	G1	5%	<0,05
30%	50%	G1	10%	1,000
30%	50%	G2	0%	<0,05
30%	50%	G2	5%	<0,05
30%	50%	G2	10%	<0,05

Fonte: Autor

As comparações entre as concentrações de contaminante também apresentaram pouca diferença em relação ao mês 1. Os cenários com 5% e 10% não apresentaram diferenças significativas para mais uma combinação de fatores (G1-40%) (Tabela 22).

Tabela 22 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 4. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Água	
0%	5%	G1	30%	<0,05
0%	5%	G1	40%	<0,05
0%	5%	G1	50%	<0,05
0%	5%	G2	30%	<0,05
0%	5%	G2	40%	<0,05
0%	5%	G2	50%	<0,05
0%	10%	G1	30%	<0,05
0%	10%	G1	40%	<0,05
0%	10%	G1	50%	<0,05
0%	10%	G2	30%	<0,05
0%	10%	G2	40%	<0,05
0%	10%	G2	50%	<0,05
5%	10%	G1	30%	0,178
5%	10%	G1	40%	0,985
5%	10%	G1	50%	0,774
5%	10%	G2	30%	<0,05
5%	10%	G2	40%	<0,05
5%	10%	G2	50%	1,000

Fonte: Autor

4.5.3 Mês 5

A comparação entre os cenários com G1 e G2 tiveram mais uma combinação de fatores sem diferença significativa (teor de umidade 30% e concentração de diesel 0%) (Tabela 23).

Tabela 23- Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 5. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor
		Diesel	Água	
G1	G2	0%	30%	1,000
G1	G2	0%	40%	0,998
G1	G2	0%	50%	<0,05
G1	G2	5%	30%	<0,05
G1	G2	5%	40%	0,565
G1	G2	5%	50%	1,000
G1	G2	10%	30%	0,999
G1	G2	10%	40%	0,286
G1	G2	10%	50%	0,003

Fonte: Autor

As comparações entre os teores de umidade apresentaram menos diferença significativa entre as combinações de fatores do que o mês 4 (Tabela 24). Apenas a granulometria G2 possuiu diferenças significativas entre os cenários com 30%-40%, 40%-50% e 30-50% de teor de umidade.

Tabela 24 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% do teor de umidade para o mês 5. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Diesel	
30%	40%	G1	0%	<0,05
30%	40%	G1	5%	0,106
30%	40%	G1	10%	0,848
30%	40%	G2	0%	<0,05
30%	40%	G2	5%	<0,05
30%	40%	G2	10%	0,018
40%	50%	G1	0%	0,994
40%	50%	G1	5%	<0,05
40%	50%	G1	10%	<0,05
40%	50%	G2	0%	<0,05
40%	50%	G2	5%	<0,05
40%	50%	G2	10%	<0,05
30%	50%	G1	0%	0,001
30%	50%	G1	5%	<0,05
30%	50%	G1	10%	<0,05
30%	50%	G2	0%	1,000
30%	50%	G2	5%	<0,05
30%	50%	G2	10%	<0,05

Fonte: Autor

Comparado as concentrações de diesel no mês 5, a variação da resistividade foi explicada significativamente apenas para as combinações da granulometria G2 e teor de umidade de 30% e 40% (Tabela 25). Portanto, essa comparação entre cenários foi bastante distinta da obtida para o mês 1.

Tabela 25– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 5. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Água	
0%	5%	G1	30%	0,756
0%	5%	G1	40%	<0,05
0%	5%	G1	50%	<0,05
0%	5%	G2	30%	<0,05
0%	5%	G2	40%	<0,05
0%	5%	G2	50%	<0,05
0%	10%	G1	30%	0,006
0%	10%	G1	40%	<0,05
0%	10%	G1	50%	<0,05
0%	10%	G2	30%	<0,05
0%	10%	G2	40%	<0,05
0%	10%	G2	50%	<0,05
5%	10%	G1	30%	0,905
5%	10%	G1	40%	0,999
5%	10%	G1	50%	0,160
5%	10%	G2	30%	<0,05
5%	10%	G2	40%	<0,05
5%	10%	G2	50%	0,999

Fonte: Autor

4.5.4 Mês 7

A comparação entre os cenários com G1 e G2 tiveram mais duas combinações de fatores com diferença significativa (teor de umidade 30%; concentração de contaminante; 0% e teor de umidade 50%; concentração de contaminante 5%) (Tabela 26).

Tabela 26- Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com G1 e G2 do fator granulometria do solo para o mês 7. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor
		Diesel	Água	
G1	G2	0%	30%	<0,05
G1	G2	0%	40%	0,015
G1	G2	0%	50%	0,006
G1	G2	5%	30%	<0,05
G1	G2	5%	40%	0,988
G1	G2	5%	50%	<0,05
G1	G2	10%	30%	0,996
G1	G2	10%	40%	0,999
G1	G2	10%	50%	0,043

Fonte: Autor

As comparações entre os teores de umidade apresentaram a mesma quantidade de diferenças significativas entre as combinações de fatores do que o mês 5. No entanto, os cenários com granulometria G2, concentrações de contaminante (0% e 10%) e diferença entre teores de umidade de 30%-40%, passaram a não possuir diferenças significativas (Tabela 27).

Tabela 27 – Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 30%, 40 % e 50% do teor de umidade para o mês 7. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Diesel	
30%	40%	G1	0%	<0,05
30%	40%	G1	5%	1,000
30%	40%	G1	10%	0,999
30%	40%	G2	0%	0,998
30%	40%	G2	5%	<0,05
30%	40%	G2	10%	0,974
40%	50%	G1	0%	0,041
40%	50%	G1	5%	<0,05
40%	50%	G1	10%	<0,05
40%	50%	G2	0%	0,019
40%	50%	G2	5%	<0,05
40%	50%	G2	10%	<0,05
30%	50%	G1	0%	<0,05
30%	50%	G1	5%	<0,05
30%	50%	G1	10%	<0,05
30%	50%	G2	0%	<0,05
30%	50%	G2	5%	<0,05
30%	50%	G2	10%	<0,05

Fonte: Autor

Comparando as concentrações de contaminante no mês 7, a variação da resistividade (quando considerado as comparações entre as três concentrações do contaminante em conjunto – 0%, 5% e 10%) foi explicada significativamente apenas para as combinações de granulometria G2 e teor de umidade de 30% (Tabela 28). Vale ressaltar também, que quando comparada as concentrações de contaminante de 5% e 10%, apenas os cenários com granulometrias G1 e G2 e teor de umidade de 30% possuem diferenças significativas, o que indica uma aproximação dos valores de resistividade entre os cenários com concentração de contaminante de 5% e 10%

Tabela 28– Teste de Tukey comparando as diferenças entre os cenários com 0%, 5 % e 10% para concentração de diesel para o mês 7. P-valor menor 5% indica rejeição de H0 = média das amostras são iguais.

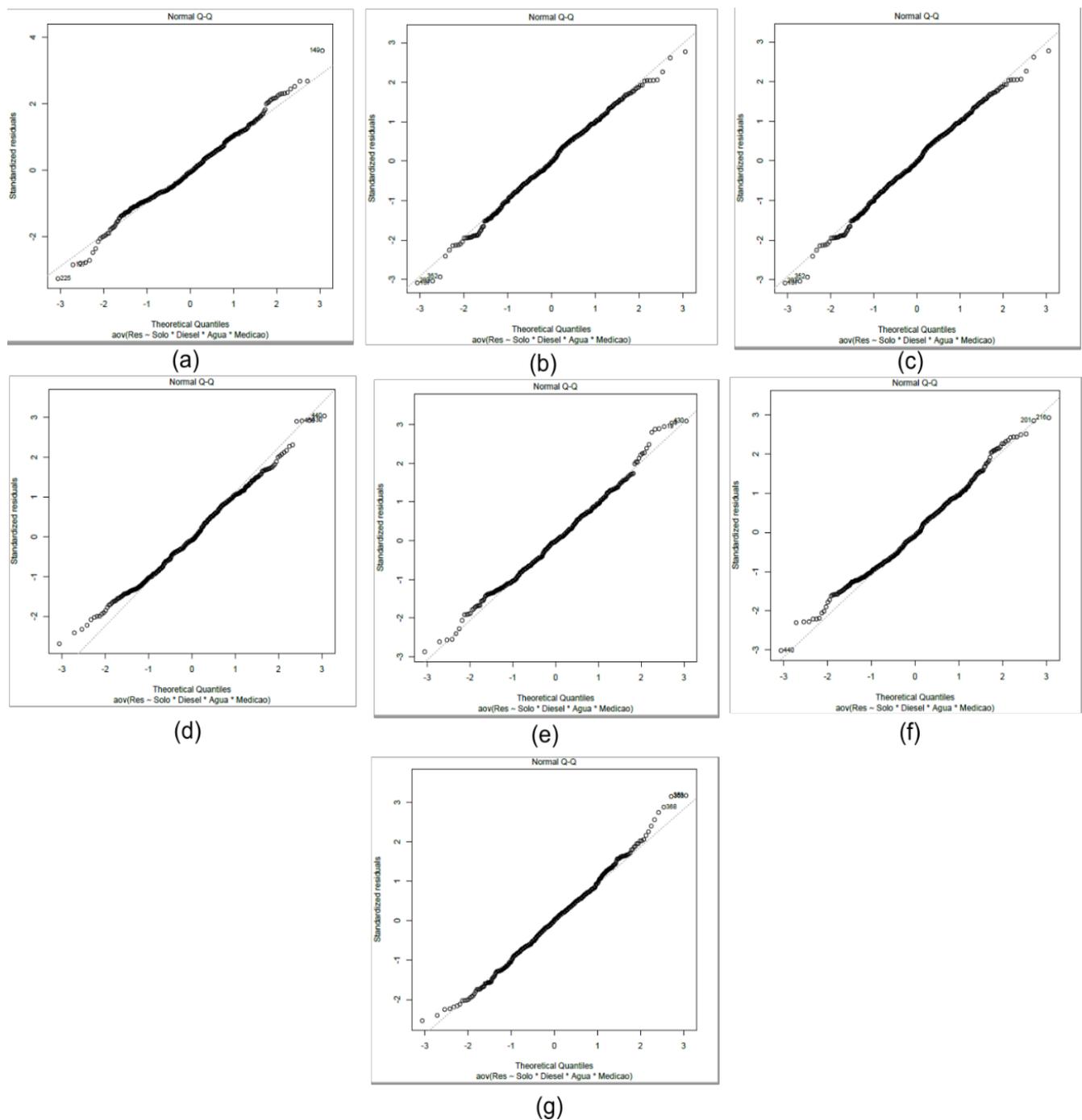
Cenários comparados		Demais fatores		P valor da interação
		Solo	Água	
0%	5%	G1	30%	0,016
0%	5%	G1	40%	<0,05
0%	5%	G1	50%	<0,05
0%	5%	G2	30%	<0,05
0%	5%	G2	40%	<0,05
0%	5%	G2	50%	<0,05
0%	10%	G1	30%	1,000
0%	10%	G1	40%	<0,05
0%	10%	G1	50%	<0,05
0%	10%	G2	30%	<0,05
0%	10%	G2	40%	<0,05
0%	10%	G2	50%	<0,05
5%	10%	G1	30%	0,025
5%	10%	G1	40%	0,273
5%	10%	G1	50%	1,000
5%	10%	G2	30%	<0,05
5%	10%	G2	40%	0,715
5%	10%	G2	50%	0,168

Fonte: Autor

4.5.5 Verificação dos Pressupostos da ANOVA

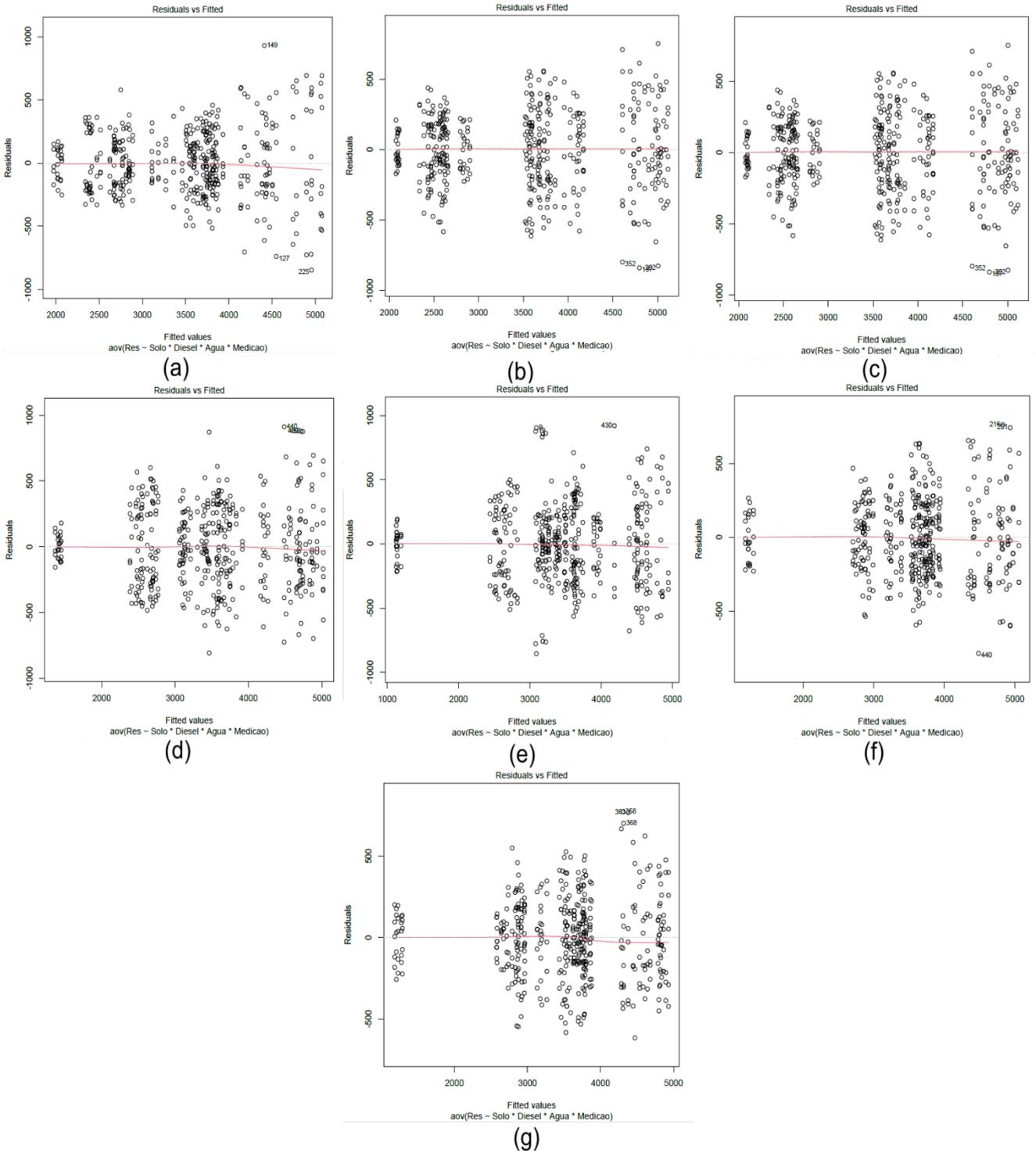
Os dados dos resíduos da ANOVA foram normais e aleatórios (Figura 18 e 19).

Figura 18– Teste de normalidade dos resíduos das ANOVA realizadas para cada mês: a) mês 1; b) mês 2; c) mês 3; d) mês 4; e) mês 5; f) mês 6 e g) mês 7.



Fonte: Autor

Figura 19– Aleatoriedade dos resíduos das ANOVA realizadas para cada mês: a) mês 1; b) mês 2; c) mês 3; d) mês 4; e) mês 5; f) mês 6 e g) mês 7.



Fonte: Autor

4.6 ANÁLISE DA TENDÊNCIA TEMPORAL

Para análise de tendência temporal foi utilizado o teste Wilcoxon, verificando se existem diferenças significativas entre as resistividades de uma combinação de fatores durante os 7 meses de análise (fazendo uma comparação mês a mês). O fator tempo está associado principalmente a biodegradação do contaminante, com isso os cenários com óleo diesel e sem óleo diesel possuem comportamentos diferentes e serão avaliadas em tópicos diferentes.

4.6.1 Sem óleo diesel

Ao analisar os cenários sem a presença de contaminante, é possível notar que a resistividade ao longo do tempo segue uma tendência, em que, até o terceiro mês ocorre uma pequena queda dos valores de resistividade e a partir do mês 4 ou 5 (na maioria deles) ocorre um pequeno aumento da resistividade em relação aos primeiros meses, que é comprovando com diferenças estatísticas.

. Pela análise de Wilcoxon, os meses que possuem maiores diferenças significativas são o 5, 6 e 7 (Tabela 29), que de acordo com o boxplots foram os meses que possuíram os maiores valores de resistividade na maior parte dos cenários. E os cenários que tiveram maiores diferenças significativas ao longo dos 7 meses de análise foram o G1-30%, G2- 30% e G2 – 50% (Figura 20).

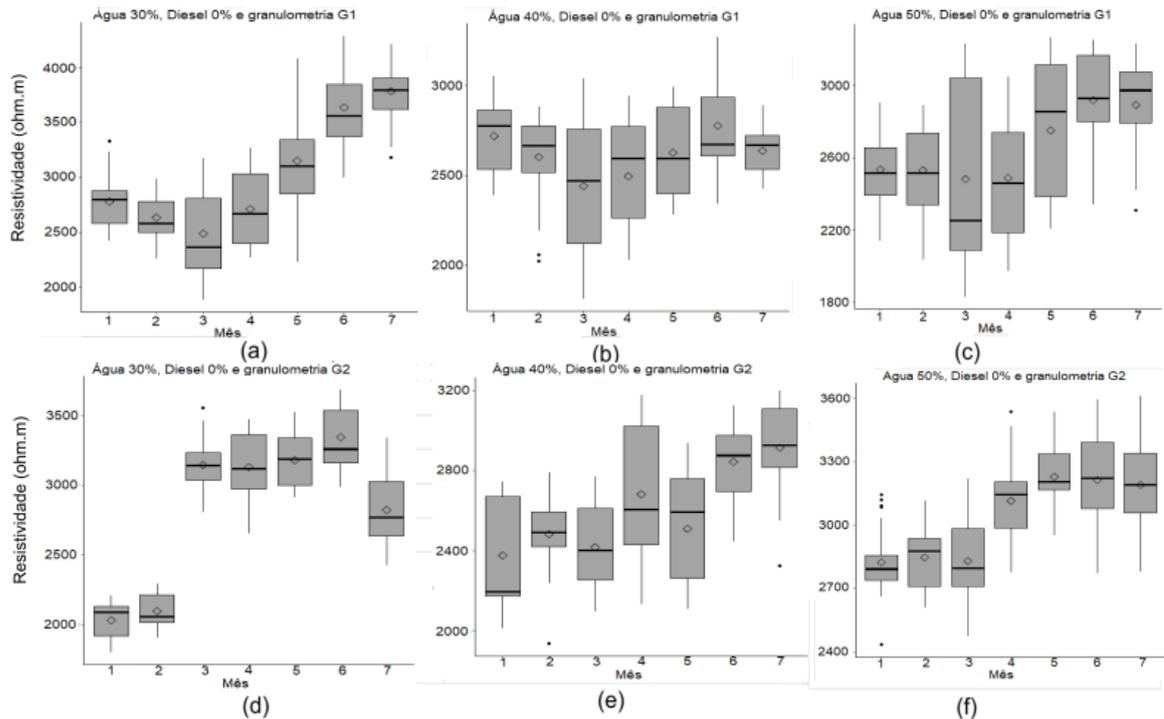
Tabela 29- Teste de Wilcoxon para cenários sem contaminante

Cenário 1	Mês	P valor da interação						
		1	2	3	4	5	6	7
G1	1	-					X	X
	2	-	-				X	X
30%	3	-	-	-	X	X	X	X
	4	-	-	-	-	X	X	X
	5	-	-	-	-	-	X	X
0%	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 2	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G1	1	-			X			
	2	-	-					
40%	3	-	-	-			X	
	4	-	-	-	-		X	
	5	-	-	-	-	-		
0%	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 3	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G1	1	-					X	X
	2	-	-				X	X
50%	3	-	-	-			X	
	4	-	-	-	-		X	X
	5	-	-	-	-	-		
0%	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 10	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G2	1	-	X	X	X	X	X	X
	2	-	-	X	X	X	X	X
30%	3	-	-	-			X	X
	4	-	-	-	-		X	X
	5	-	-	-	-	-	X	X
0%	6	-	-	-	-	-	-	X
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 11	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G2	1	-					X	X
	2	-	-				X	X
40%	3	-	-	-	X		X	X
	4	-	-	-	-			
	5	-	-	-	-	-	X	X
0%	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 12	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G2	1	-			X	X	X	X
	2	-	-		X	X	X	X
50%	3	-	-	-	X	X	X	X
	4	-	-	-	-		X	
	5	-	-	-	-	-		
0%	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-

X – Representa que as amostras possuem diferenças significativas entre elas (<0,05)

Fonte: Autor

Figura 20- Boxplots a) cenário 1, b) cenário 2, c) cenário 3, d) cenário 10, e) cenário 11, f) cenário 12



Fonte: Autor

4.6.2 Com 5% de óleo diesel

Nos cenários com 5% de contaminante, a resistividade ao longo do tempo não possui um comportamento padrão, ou seja, em cada um dos cenários possui uma variação de resistividade diferente ao longo dos meses. Mas na maior parte dos cenários, o que ocorre de semelhante entre eles é uma queda de resistividade a partir do terceiro mês. Pela análise de Wilcoxon, os meses que possuem maiores diferenças significativas são o 3 e 5 (Tabela 30). Os cenários que tiveram maiores diferenças significativas ao longo dos 7 meses de análise foram o G2-30%, G2- 40% e G2 – 50% (Figura 21). O que mostra que os cenários com granulometrias menores tiveram maiores diferenças significativas entre os meses de análise.

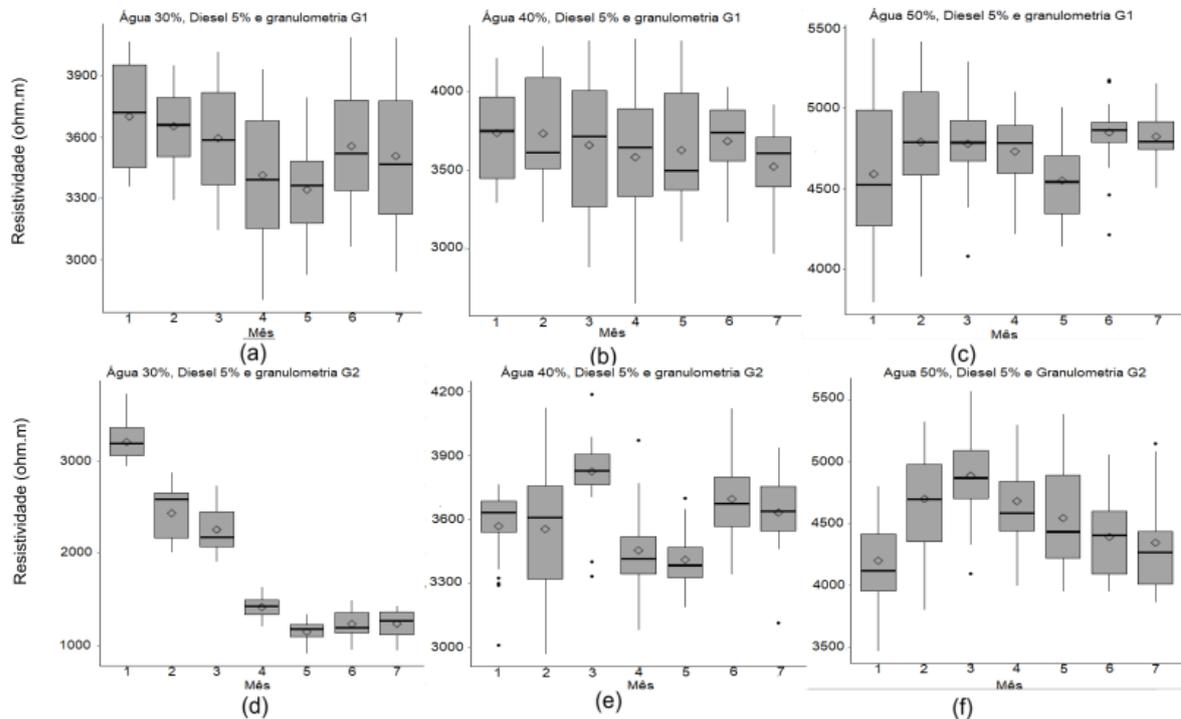
Tabela 30 - Teste de Wilcoxon para cenários com 5% de óleo diesel

		P valor da interação							
Cenário 4	Mês	1	2	3	4	5	6	7	
G1	1	-			X	X			
	2	-	-			X			
	30%	3	-	-	-				
		4	-	-	-	-			
		5	-	-	-	-	-		
	5%	6	-	-	-	-	-	-	
		7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 5	Mês	1	2	3	4	5	6	7	
G1	1	-							
	2	-	-						
	3	-	-	-					
40%	4	-	-	-	-				
	5	-	-	-	-	-			
5%	6	-	-	-	-	-	-		
	7	-	-	-	-	-	-	-	
Cenário 6	Mês	1	2	3	4	5	6	7	
G1	1	-							
	2	-	-						
	3	-	-	-					
50%	4	-	-	-	-				
	5	-	-	-	-	-			
5%	6	-	-	-	-	-	X	X	
	7	-	-	-	-	-	-	-	
Cenário 13	Mês	1	2	3	4	5	6	7	
G2	1	-	X	X	X	X	X	X	
	2	-	-	X	X	X	X	X	
30%	3	-	-	-	X	X	X	X	
	4	-	-	-	-	X	X	X	
	5	-	-	-	-	-			
5%	6	-	-	-	-	-	-	-	
	7	-	-	-	-	-	-	-	
Cenário 14	Mês	1	2	3	4	5	6	7	
G2	1	-		X					
	2	-	-	X					
	3	-	-	-	X	X		X	
40%	4	-	-	-	-		X	X	
	5	-	-	-	-	-	X	X	
5%	6	-	-	-	-	-	-	-	
	7	-	-	-	-	-	-	-	
Cenário 15	Mês	1	2	3	4	5	6	7	
G2	1	-	X	X	X				
	2	-	-				X		
50%	3	-	-	-		X	X	X	
	4	-	-	-	-		X		
	5	-	-	-	-	-	-	-	
5%	6	-	-	-	-	-	-	-	
	7	-	-	-	-	-	-	-	

X – Representa que as amostras possuem diferenças significativas entre elas (<0,05)

Fonte: Autor

Figura 21- Boxplots a) cenário 4, b) cenário 5, c) cenário 6, d) cenário 13, e) cenário 14, f) cenário 15



Fonte: Autor

4.6.3 Com 10% de diesel

Nos cenários com 10% de contaminante, a resistividade ao longo do tempo não possui um comportamento padrão, ou seja, em cada um dos cenários possui uma variação de resistividade diferente ao longo dos meses. No entanto, assim como ocorreu nos cenários com 5% de contaminante, a partir do mês 2 e 3 (na maioria deles) ocorre um decaimento da resistividade em relação aos primeiros meses, que é comprovado pelas diferenças estatísticas para a granulometria mais fina (menor que 0,06) para diferentes teores de umidade do solo.

Pela análise de Wilcoxon, os meses que possuem maiores diferenças significativas são o 3, 4 e 5 (Tabela 31), e ao analisar os boxplots é possível notar uma queda da resistividade nesses três meses e a existência dessas diferenças significativas mostra que a queda da resistividade foi representativa nesse período. Os cenários que tiveram maiores diferenças significativas ao longo dos 7 meses de análise foram o G2- 40% e G2 – 50% (Figura 22).

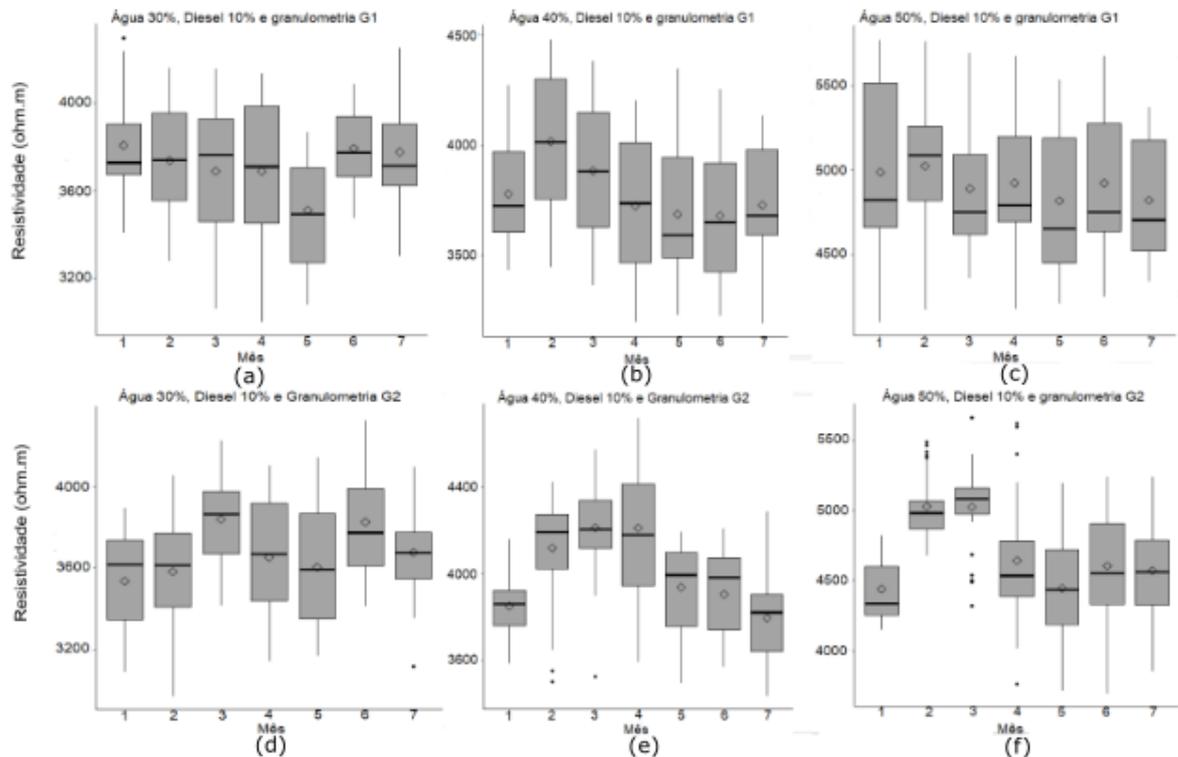
Tabela 31 - Teste de Wilcoxon para cenários com 10% de óleo diesel

		P valor da interação						
Cenário 7	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G1	1	-				X		
	2	-	-			X		
30%	3	-	-	-				
	4	-	-	-	-			
10%	5	-	-	-	-	-	X	
	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 8	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G1	1	-	X					
	2	-	-		X			X
40%	3	-	-	-				
	4	-	-	-	-			
10%	5	-	-	-	-	-		
	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 9	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G1	1	-						
	2	-	-					
50%	3	-	-	-				
	4	-	-	-	-			
10%	5	-	-	-	-	-		
	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 16	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G2	1	-		X				
	2	-	-					
30%	3	-	-	-				
	4	-	-	-	-			
10%	5	-	-	-	-	-		
	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 17	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G2	1	-	X	X	X			
	2	-	-				X	X
40%	3	-	-	-		X	X	X
	4	-	-	-	-	X	X	X
10%	5	-	-	-	-	-		
	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-
Cenário 18	Mês	1	2	3	4	5	6	7
G2	1	-	X	X				
	2	-	-		X	X	X	X
50%	3	-	-	-	X	X	X	X
	4	-	-	-	-			
10%	5	-	-	-	-	-		
	6	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	-

X – Representa que as amostras possuem diferenças significativas entre elas (<0,05)

Fonte: Autor

Figura 22- Boxplots a) cenário 7, b) cenário 8, c) cenário 9, d) cenário 16, e) cenário 17, f) cenário 18



Fonte: Autor

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS

4.7.1 Mês 1

A partir da análise dos boxplots, do mês 1 (Figura 23), de todos os 18 cenários é possível ver um melhor detalhamento da variação da resistividade em função da variação da granulometria, teor de umidade e concentração do contaminante.

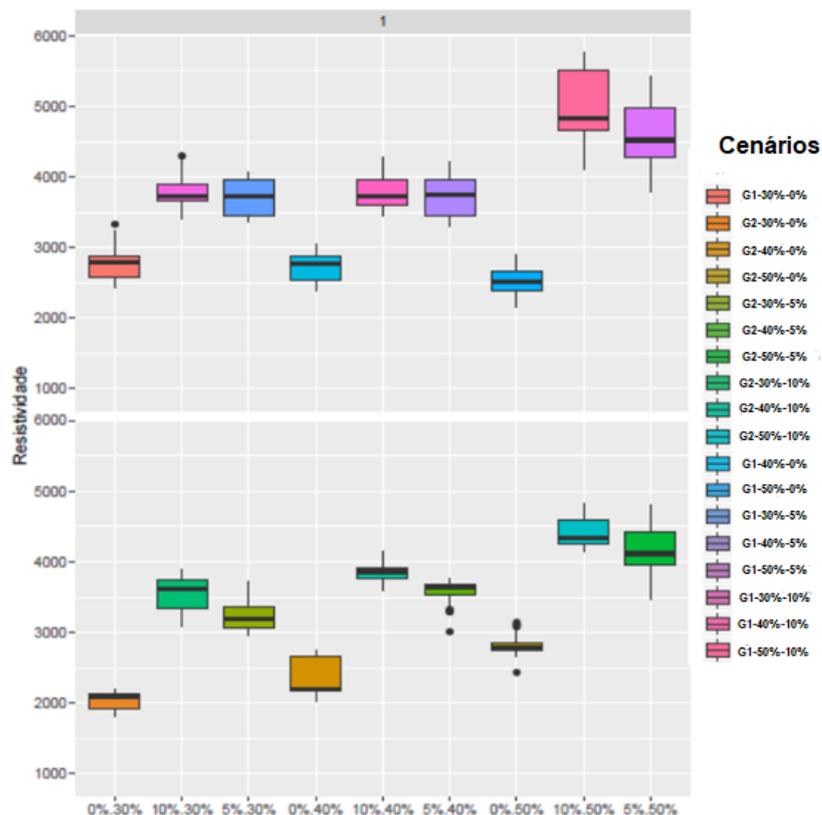
Ao comparar os cenários com granulometria G1 (1 ao 9) com os cenários de granulometria G2 (10 ao 18), os cenários de granulometria grossa G1 possuem uma maior resistividade. O único cenário que isso não acontece é o de 40% -10%, que as resistividades são semelhantes.

Ao analisar o teor de umidade, nos cenários sem contaminante (1, 2 e 3) foi possível notar uma diminuição da resistividade do solo a partir do momento que houve um aumento do seu teor de umidade, ou seja, nos cenários constituídos de solo com a granulometria grossa (G1) ocorreu uma diminuição da resistividade. Já nos cenários 10, 11 e 12, que são constituídas de solo com a granulometria fina (G2) ocorreu um aumento da resistividade.

Já solo com a presença de poluente, a variação da sua resistividade está condicionada a três fatores, a granulometria, o teor de umidade desse solo e a porcentagem de óleo diesel adicionada a amostra. Nesses cenários, aumento do teor de umidade, associado com a presença de óleo diesel, proporciona um aumento na resistividade, tanto nos cenários de solo de granulometria grossa (G1), 4, 5, 6, 7, 8 e 9, quanto nos cenários de solo de granulometria fina (G2), 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

Em relação a concentração de contaminante, a adição do óleo diesel causou um aumento da resistividade, tendo em vista que todos os cenários com 5% ou 10% possuem resistividades maiores que os cenários com 0% de contaminante. Comparando os cenários com 5% e 10% de contaminante, o aumento dessa concentração de contaminante ocasionou o aumento da resistividade. Apenas nos cenários G1- 30% e G1- 40% isso não aconteceu, esses cenários tiveram resistividades semelhantes.

Figura 23– Resistividade para as 18 combinações de fatores no mês 1



Fonte: Autor

4.7.2 Mês 4

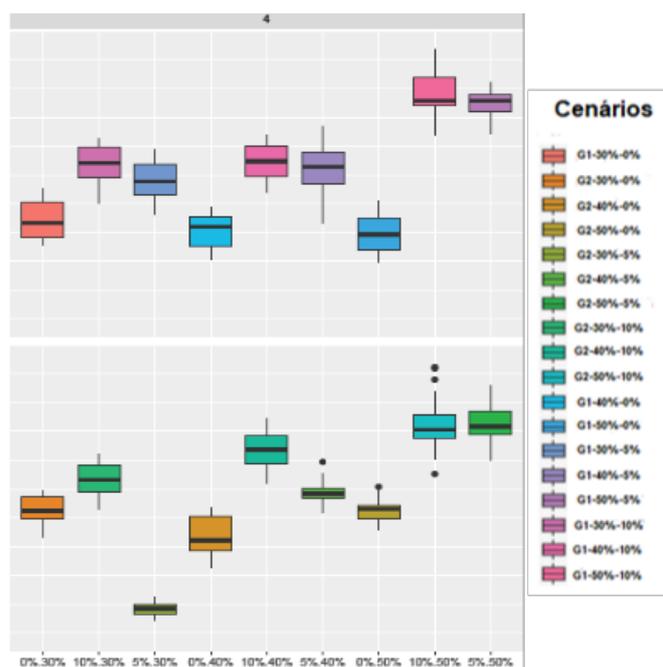
Ao analisar os boxplots do mês 4 (Figura 24), e compará-lo com os valores de resistividade do mês 1, é possível notar que ao longo dos meses ocorre uma variação da resistividade nos 18 cenários, que podem estar relacionadas com as alterações de granulometria, teor de umidade e concentração de contaminante.

Em relação a granulometria, no mês 1, apenas o cenário 40%-10% não apresentava a resistividade de G1 maior do que G2. No mês 4, os cenários 30%-0%, 30%-10%, 40% -0%, 40%-10% e 50%-0% não possuem resistividade de G1 maior do que G2.

No mês 1, apenas os cenários com G1-0% tiveram uma diminuição de resistividade com o aumento do teor de umidade. No mês 4, além do G1-0%, os cenários que possuem G2-0% passaram a ter uma diminuição da resistividade com o aumento do teor de umidade.

No mês 4, assim como no mês 1, os cenários com 5% ou 10% de contaminante possuem resistividades maiores que os cenários com 0% de contaminante. E comparando os cenários com 5% e 10%, o aumento dessa concentração de contaminante ocasionou o aumento da resistividade. Apenas no cenário G2- 50% essa tendência não se concretizou.

Figura 24- Resistividade para as 18 combinações de fatores no mês 4

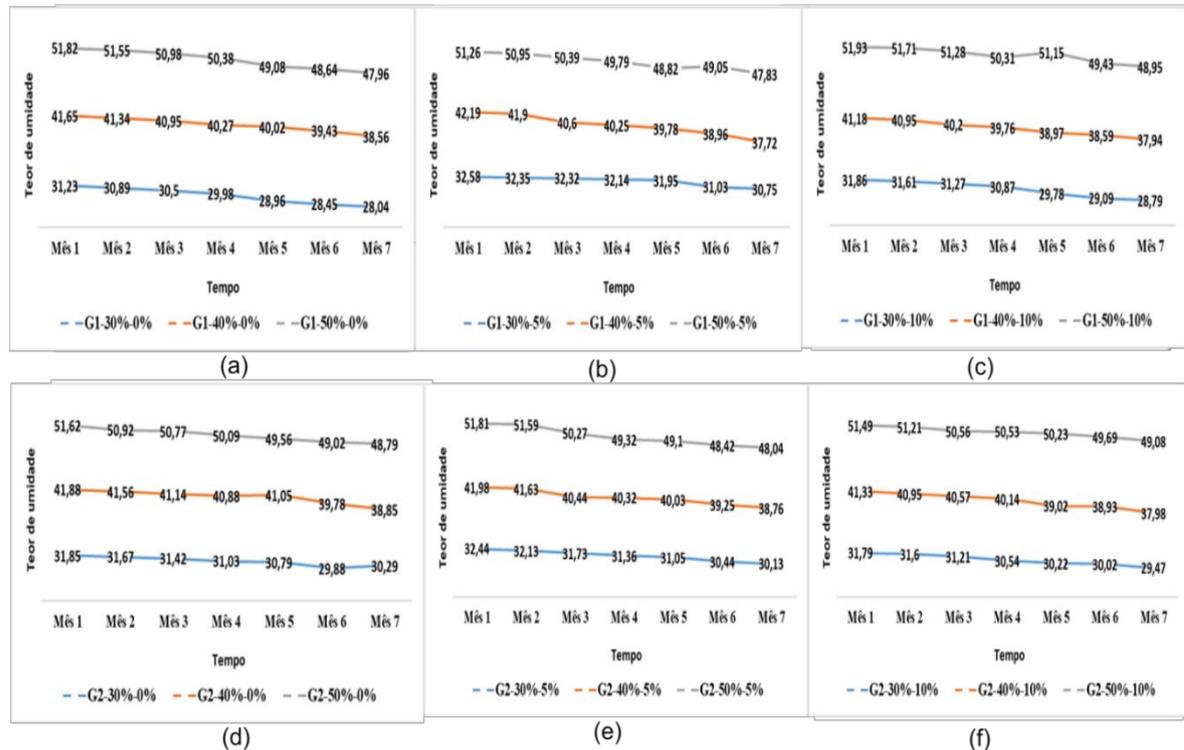


Fonte: Autor

4.8 TEOR DE UMIDADE NAS BOMBONAS

O teor de umidade nas bombonas (Figura 25), medido mensalmente para cada um dos 18 cenários, apresentou redução ao longo dos 7 meses de análise. Essa redução final variou entre 1,56% e 4,47% (Tabela 32).

Figura 25- Teor de umidade medido nas bombas ao longo dos 7 meses de teste: a) cenários 1, 2 e 3, b) cenários 4, 5 e 6, c) cenários 7, 8 e 9, d) cenários 10, 11 e 12, e) cenários 13, 14 e 15, f) cenários 16, 17 e 18



Fonte: Autor

Tabela 32 – Variação do teor de umidade entre os meses

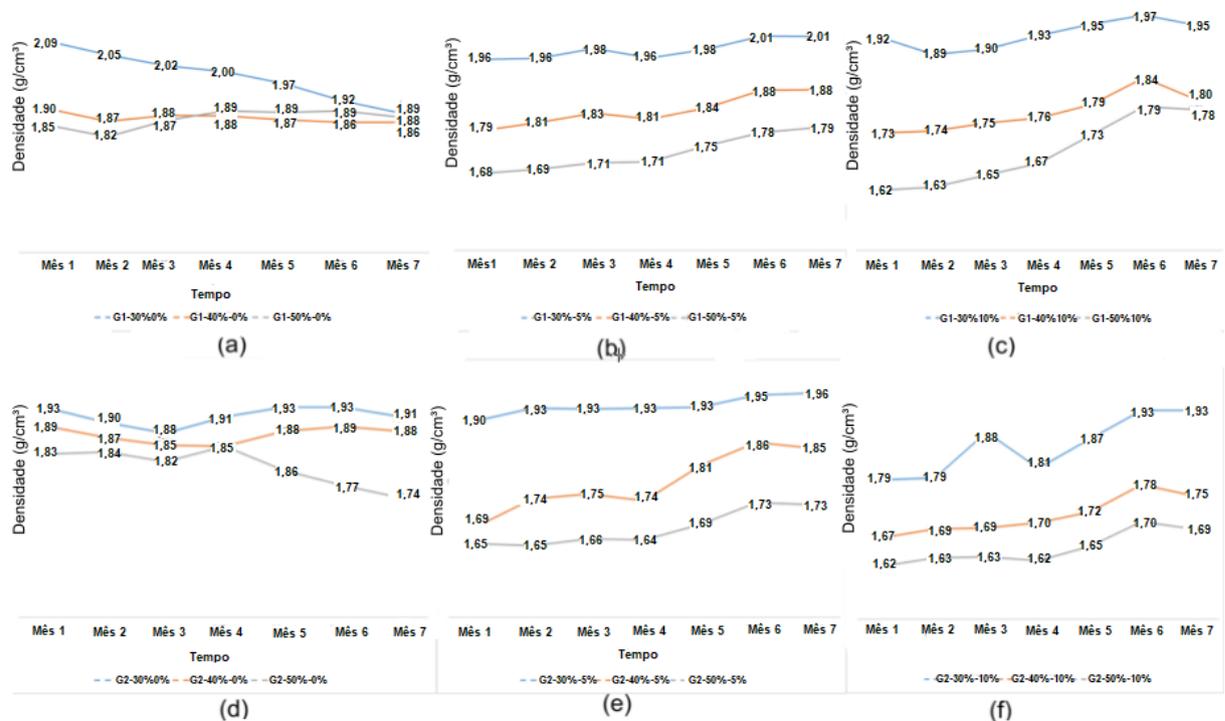
Combinação de fatores			Variação do teor de umidade entre os meses (%)						
			1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	Total
G1	30%	0%	-0,34	-0,39	-0,52	-1,02	-0,51	-0,41	-3,19
G1	40%	0%	-0,31	-0,39	-0,68	-0,25	-0,59	-0,87	-3,09
G1	50%	0%	-0,27	-0,57	-0,60	-1,30	-0,44	-0,68	-3,86
G1	30%	5%	-0,23	-0,03	-0,18	-0,19	-0,92	-0,28	-1,83
G1	40%	5%	-0,29	-1,30	-0,35	-0,47	-0,82	-1,24	-4,47
G1	50%	5%	-0,31	-0,56	-0,60	-0,97	0,23	-1,22	-3,43
G1	30%	10%	-0,25	-0,34	-0,40	-1,09	-0,69	-0,30	-3,07
G1	40%	10%	-0,23	-0,75	-0,44	-0,79	-0,38	-0,65	-3,24
G1	50%	10%	-0,22	-0,43	-0,97	0,84	-1,72	-0,48	-2,98
G2	30%	0%	-0,18	-0,25	-0,39	-0,24	-0,91	0,41	-1,56
G2	40%	0%	-0,32	-0,42	-0,26	0,17	-1,27	-0,93	-3,03
G2	50%	0%	-0,70	-0,15	-0,68	-0,53	-0,54	-0,23	-2,83
G2	30%	5%	-0,31	-0,40	-0,37	-0,31	-0,61	-0,31	-2,31
G2	40%	5%	-0,35	-1,19	-0,12	-0,29	-0,78	-0,49	-3,22
G2	50%	5%	-0,22	-1,32	-0,95	-0,22	-0,68	-0,38	-3,77
G2	30%	10%	-0,19	-0,39	-0,67	-0,32	-0,20	-0,55	-2,32
G2	40%	10%	-0,38	-0,38	-0,43	-1,12	-0,09	-0,95	-3,35
G2	50%	10%	-0,28	-0,65	-0,03	-0,30	-0,54	-0,61	-2,41

Fonte: Autor

4.9 DENSIDADE DO SOLO NO APARATO EXPERIMENTAL

A densidade do solo teve um comportamento diferente para os cenários sem contaminante e com contaminante (Figura 26). Na maior parte dos cenários sem contaminante (0% de óleo diesel), a densidade teve uma pequena variação ao longo dos 7 meses, exceto para G1-30% e G2-50% que tiveram uma queda na densidade. Já os cenários com contaminante (5% e 10%) tiveram um aumento da densidade ao longo dos 7 meses.

Figura 26- Densidade do solo no aparato experimental ao longo dos 7 meses de teste: a) cenários 1, 2 e 3, b) cenários 4, 5 e 6, c) cenários 7, 8 e 9, d) cenários 10, 11 e 12, e) cenários 13, 14 e 15, f) cenários 16, 17 e 18



Fonte: Autor

5 DISCUSSÃO

Os métodos geofísicos têm sido utilizados em estudos que monitoram a biodegradação natural de contaminantes (MOREIRA; DOURADO, 2007; ALEGRIA; MARTINHO; ALMEIDA, 2009; BRAGA; MOREIRA, 2012; GIAMPAOLO *et al.*, 2014). Diversos fatores podem alterar os resultados obtidos nessas pesquisas, como, a granulometria, a concentração de contaminante (LIU; LIU; CAI, 2015), porosidade (MARTINHO *et al.*, 2010), o tipo de contaminante (MARTINHO; ALMEIDA; MATIAS, 2006), o teor de umidade (BIAN *et al.*, 2016) e o tempo (ALEGRIA; MARTINHO; ALMEIDA, 2009). No entanto, pouco se entende sobre a interação desses fatores, devido à ausência de pesquisas que abordam essa temática.

Os fatores granulometria, teor de umidade, concentração de contaminante interagiram alterando a resistividade. Essa interação provocou maior resistividade: i) para granulometria mais grossa (entre 2 mm e 0,06mm) do que para granulometria mais fina (menor que 0,06 mm), ii) para os maiores teores de umidade (40% e 50%); iii) para as maiores concentrações de diesel (5% e 10%). Os valores de resistividade dos cenários com granulometria mais fina (menor que 0,06 mm), ao longo do tempo, se aproximaram dos valores de resistividade dos cenários com granulometria mais grossa (entre 2 mm e 0,06mm). O decaimento da resistividade com a biodegradação, antecedido pelo aumento inicial, ocorreu principalmente entre o segundo e terceiro mês, sendo comprovado através das diferenças significativas dos valores entre os meses de teste principalmente na granulometria 2 para os diferentes teores de umidade do solo. O confinamento do solo úmido em recipientes permitiu a ocorrência de processos que levam ao aumento resistividade a partir do quarto ou quinto mês. Não foi clara a ocorrência de estabilização dos valores de resistividade nos últimos meses.

A resistividade das combinações com 10% de contaminante passou ser mais semelhantes estaticamente as com 5 % de contaminante a partir do quarto mês. Solo sem contaminante: a partir do mês 4 ou 5 (na maioria deles) ocorre um pequeno aumento da resistividade em relação aos primeiros meses, que é comprovado com diferenças estatísticas; Solo com contaminante 5 e 10%: a partir do mês 2 e 3 (na maioria deles) ocorre um decaimento da resistividade em relação aos primeiros meses, que é comprovado pelas diferenças estatísticas para a granulometria mais fina (menor que 0,06 mm) para diferentes teores de umidade do solo.

Em todos os cenários testados, ao longo do tempo, os diferentes teores de umidade influenciaram na variação da resistividade, principalmente nos cenários com granulometria mais fina (menor que 0,06 mm), comprovado pelas diferenças estatísticas entre os dados dos 7 meses. No mês 4, os cenários com 5% e 10% passaram a não apresentar diferenças significativas para mais uma combinação de fatores (G1-40%) e no mês 7, apenas as combinações (G1-30% e G2-30%) apresentaram diferenças significativas.

Ao analisar o fator tempo, nos cenários sem contaminante, é possível notar que a resistividade ao longo do tempo segue uma tendência, em que, até o terceiro mês ocorre uma queda dos valores de resistividade e após o terceiro mês de análise essa resistividade tem um aumento. Já nos cenários com contaminante, não possui um comportamento padrão, ou seja, cada um dos cenários possui uma variação de resistividade diferente ao longo dos meses. Mas na maior parte dos cenários, o que ocorre de semelhante entre elas é uma queda de resistividade a partir do terceiro mês.

Era esperado que os cenários com granulometria mais grossa (entre 2 mm e 0,06mm) possuíssem resistividades maiores que os com granulometria mais fina (menor que 0,06mm). Segundo Telford, Geldart e Sheriff (1990), a corrente elétrica pode se propagar em geomateriais por condução iônica, ou seja, a partir da quantidade e da condutividade dos materiais presentes no solo.

De acordo com Abidin *et al.* (2017), o solo com textura argilosa, possui em sua composição partículas minerais como a caulinita, illita, hematita, vermiculita, entre outras, e isso faz com que ocorra uma propagação mais fácil da corrente elétrica quando comparada a um solo com textura arenosa, resultando em menores valores de resistividade. Este resultado é semelhante ao encontrado por Zhou *et al.* (2015), que estudaram a relação entre a resistividade e a granulometria do solo fazendo esse comparativo para cinco tipos de granulometrias diferentes, arenosa, areno-siltosa, silte, silto-argilosa e argila. Estes autores encontraram que para um teor de umidade fixo de 30% para todas as cinco amostras, resistividades de aproximadamente 650 ohm.m, 320 ohm.m, 300 ohm.m, 220 ohm.m e 195 ohm.m para as granulometrias de solo arenoso, areno-siltoso, silte, silto-argiloso e argila, respectivamente. Ao analisar o comportamento da resistividade nessas cinco granulometrias, os autores observaram que as amostras de granulometrias maiores foram as que resultaram em maiores valores de resistividade.

Outro estudo que corrobora com os resultados encontrados é o de Martinho, Almeida e Matias (2006). Esses autores compararam duas amostras sem poluentes, uma com granulometria < 2 mm e outra com granulometria < 1 mm, obtendo valores de resistividade de 83 ohm.m e 52 ohm.m, respectivamente. A partir desses resultados os autores também concluíram o aumento da resistividade está diretamente relacionado com o aumento do tamanho dos grãos presentes nas amostras.

De acordo com Bian *et al.* (2016), os íons contidos no fluido presente nos poros do solo são mais difíceis de propagar em solos com baixo teor de umidade, resultando em um aumento da resistividade do solo. Devido a isso, aumento da resistividade associado com o aumento do teor de umidade não era um resultado esperado, tendo em vista que ele contrapõe aos resultados obtidos em muitos estudos (Bian *et al.* (2016), Zhou *et al.* (2015) e Kolay, Burra, Kumar (2018)).

Apenas os cenários 1, 2 e 3 (G1-0%), tiveram uma diminuição da resistividade com o aumento do teor de umidade. Bian *et al.* (2016) analisaram a relação entre a resistividade e o teor de umidade de um solo silto-arenoso, fazendo esse comparativo para seis teores de umidade diferentes, 7%, 10%, 13%, 16%, 20% e 25%. E obtiveram os valores de resistividade de 710 ohm.m, 520 ohm.m, 410 ohm.m, 390 ohm.m, 300 ohm.m e 260 ohm.m para os teores de umidade de 7%, 10%, 13%, 16%, 20% e 25%, respectivamente. Com isso, foi constatado que existiu uma diminuição da resistividade a partir do aumento do teor de umidade.

Kolay, Burra, Kumar (2018) analisam uma amostra contendo um solo predominantemente argiloso, ou seja, composto de 73% de argila, 24% de silte e 3% de areia, ao aumentar o teor de umidade ocorreu uma diminuição da resistividade. Outra conclusão destes autores é que as amostras com teores de umidade superiores a 30% apresentaram resultados de resistividade quase constantes, ou seja, a resistividade teve uma variação pequena quando comparados teores de umidade elevados.

Já o estudo de Yoon *et al.* (2002), corrobora os resultados obtidos na presente pesquisa, tendo em vista que esses autores avaliaram em sua pesquisa o comportamento da resistividade elétrica a partir da variação do teor de umidade em um solo silto-arenoso contendo 7,5% de partículas de argila, variando os teores de

umidade das amostras em 10%, 15% e 20%. Como resposta foi obtido que a amostra contendo um teor de umidade de 20% teve um valor de resistividade superior ao obtido na amostra contendo um teor de umidade de 15%. Yoon *et al.* (2002) justificam essa variação incomum da resistividade pela presença de argila nas amostras de solo silto-arenoso. No solo contendo argila a condução da eletricidade pode ocorrer pelos poros ou pelas partículas minerais eletricamente carregadas, e essa condução de superfície pode ser um fator significativo que afeta a resistividade do solo.

Portanto, são diversas possibilidades que podem ter feito os resultados desse estudo serem diferentes dos resultados encontrados por Bian *et al.* (2016) e Kolay, Burra e Kumar (2018). A primeira possibilidade é relacionada ao tipo de água utilizada, tendo em vista que os autores citados não especificaram o tipo de água utilizada em suas pesquisas, e no presente estudo foi utilizada a água da chuva com um pH de 5,63 e isso pode ter causado uma diferença nos resultados. O segundo fator pode ter sido o tipo de solo, Bian *et al.* (2016) e Kolay, Burra e Kumar (2018) especificaram em suas pesquisas apenas a textura do solo utilizado, não detalhando o tipo de solo utilizado, já no presente estudo foi utilizado o solo do tipo latossolo vermelho perférrico. Outra possibilidade pode estar relacionada com a interação entre a granulometria, teor de umidade e concentração de óleo diesel utilizados que podem influenciar na resistividade do solo.

O aumento da resistividade relacionado com a adição e o aumento da concentração de contaminante era um resultado esperado, pois nos poros do solo, ao ser contaminado, ocorre a substituição do ar pelo contaminante. Quando o contaminante é o óleo diesel, material de baixa condutividade, a sua adição no solo faz com que sua resistividade aumente (BIAN *et al.*, 2016). Isso é confirmado por Liu, Liu e Cai (2015) que utilizaram o método da eletroresistividade em um solo argiloso contaminado com óleo diesel. Para a elaboração das amostras foi considerado um teor de umidade fixo de 10% e concentração de óleo diesel de 0%, 4%, 8%, 12%, 16% e 20%. Foi verificada um aumento da resistividade do solo a partir do aumento da concentração do contaminante.

Outra pesquisa é a de Martinho, Almeida e Matias (2006), que estuda a variação da resistividade do solo a partir do aumento da concentração de diferentes hidrocarbonetos, como a gasolina, o Isopentano, o Tolueno e o Benzeno, mostra que, o aumento da concentração de todos os quatro tipos de hidrocarbonetos ocasionou o

aumento da resistividade. Para a gasolina, os autores fizeram o comparativo dos valores de resistividade para seis tipos de concentrações de contaminante diferentes, 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%. Os autores obtiveram os valores de resistividade de aproximadamente 50 ohm.m, 53 ohm.m, 56 ohm.m, 60 ohm.m, 62 ohm.m e 69 ohm.m para as concentrações de contaminante de 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%, respectivamente.

O comportamento da resistividade nas amostras sem contaminante ao longo do tempo está relacionado principalmente com a alteração da granulometria e do teor de umidade. No presente estudo, a tendência da resistividade ao longo do tempo é de redução até o terceiro mês e posteriormente ocorre o seu aumento. Essa tendência foi um pouco diferente da encontrada por Alegria, Martinho e Almeida (2009), que analisaram a resistividade do solo sem contaminante, com 72% solo e 28% de água ao longo de 12 meses. Esses autores encontraram que a resistividade reduziu até o quarto mês de análise e posteriormente essa resistividade teve uma pequena variação.

Nas amostras com contaminante, a alteração da resistividade além de estar relacionada com a alteração da granulometria e do teor de umidade, também está relacionada com a concentração do contaminante, e no presente estudo essas amostras não possuem um comportamento padrão, mas na maior parte dos cenários, o que ocorre de semelhante entre elas é uma queda de resistividade a partir do terceiro mês.

Já Martinho *et al.* (2010) analisaram a resistividade do solo com contaminante, com 72% solo, 21% de água e 7% de óleo diesel ao longo de 12 meses e encontraram dois padrões de variação da resistividade, o primeiro, ocorreu um aumento da resistividade até o quarto mês, do quarto ao oitavo mês a resistividade cai, essa queda o autor relaciona a biodegradação do óleo diesel e após o oitavo mês ocorre um pequeno aumento da resistividade, que o autor relaciona a redução do processo de biodegradação, já no segundo padrão, ocorre uma queda de resistividade até o oitavo mês e depois há um pequeno aumento da resistividade até o mês 12. Essas variações nas tendências da resistividade não só entre os cenários analisados na presente pesquisa, mas também comparados com outros estudos demonstram que a diferença entre os fatores utilizados na amostra e a interação entre eles, como a granulometria,

o teor de umidade e concentração de contaminante tem influência na variação da resistividade do solo ao longo do tempo.

A alteração da resistividade ao longo do tempo pode estar relacionada, com a granulometria, pois existe uma diminuição do tamanho dos grãos no interior das amostras, e isso é comprovado por Bian *et al.* (2016), que analisaram um solo contaminado com óleo diesel e nessas amostras contaminadas foi medida a porcentagem de partículas maiores que 0,075, entre 0,075 e 0,005 e menores que 0,005, nos períodos de 14 aos 56 dias e com 12% de óleo diesel. E dos 14 aos 56 dias, a quantidade de partículas <0,005 foi de 15,8% para 26%, ou seja, há um aumento das partículas argilosas nas amostras e a quantidade de partículas >0,075 foi de 15,5% a 4,0%. Pode estar relacionada também com o teor de umidade, tendo em vista que as amostras tiveram uma perda de umidade média de 3% nos 7 meses de análise e com a concentração do contaminante, pois no decorrer do tempo ocorre a biodegradação do óleo diesel.

De acordo com Abdel Aal, Slater e Atekwana (2006) essa queda de resistividade relativa à biodegradação é explicada pela ocorrência de três fatores: o intemperismo mineral, a formação de biofilmes e a produção de ácidos orgânicos. A presença das bactérias ocasiona um intemperismo mineral e com isso ocorre a liberação de íons nos fluídos presentes nos poros. Devido à presença de hidrocarbonetos ocorre o crescimento das células bacterianas que se acumulam nas superfícies dos minerais presentes no solo, formando biofilmes, que são células carregadas e causam um aumento da polarização interfacial entre o mineral e o fluído poroso. A biodegradação do contaminante a partir da ação dos microorganismos presentes no solo produzem ácidos orgânicos e por consequência ocorre um aumento dos íons livres no fluído presente nos poros.

As metodologias dos estudos realizados em laboratório, relacionados a biodegradação de um contaminante diferem de forma significativa em relação ao armazenamento e compactação das amostras, Bian *et al.* (2016) não especificaram como ocorreu o armazenamento das amostras (se foi no próprio aparato experimental ou se foi em outro recipiente vedado), sendo especificado que as amostras foram guardadas em uma sala de cura padrão. Nesse trabalho, também não foi apresentado se houve compactação do material antes das medições de resistividade. Já Alegria, Martinho e Almeida (2009) confeccionaram um aparato experimental que permitia o

armazenamento do material e a medição de resistividade em um mesmo local. Entretanto, não foi abordado na publicação se antes das medições foi realizada homogeneização e compactação do material. Tendo em vista o escasso detalhamento na literatura quanto a metodologia para emprego da eletrorresistividade no estudo de solos contaminados em laboratório, acredita-se que a presente pesquisa traz uma importante contribuição quanto ao detalhamento de uma metodologia para esses testes no que toca o armazenamento das amostras, a homogeneização e compactação do solo.

Ações tais como, verificação da variação da granulometria e a reposição da umidade ao longo dos 7 meses asseguram importantes conclusões da presente pesquisa obtidas pela análise das medições de eletrorresistividade. Entretanto, análises diretas dos processos de alteração química e dos processos biológicos são limitações da presente pesquisa, ainda que não comprometam importantes conclusões inclusive corroboradas por outros estudos na literatura.

6 CONCLUSÃO

A eletrorresistividade foi capaz de monitorar indiretamente a biodegradação do diesel em solo de diferentes granulometrias e sob diferentes condições de concentração de contaminantes e teores de umidade. As análises de variância dos tipos fatorial e pareadas foram uteis na obtenção dos efeitos desses diferentes fatores sobre o processo de biodegradação.

Granulometria, teor de umidade, concentração do contaminante e o tempo de presença do contaminante no solo interagem alterando a biodegradação indicada pela variação da resistividade do solo. Maior resistividade do solo é obtida com: granulometria mais grossa (entre 2 mm e 0,06mm), maior teor de umidade, e maior concentração de óleo diesel.

O processo de biodegradação não estabiliza com 7 meses e sua velocidade de atuação depende da configuração dos fatores granulometria, teor de umidade e concentração do diesel: 1) nas amostras sem contaminante, até o terceiro mês ocorre uma queda dos valores de resistividade e após o terceiro mês de análise essa resistividade tem um aumento; 2) nas amostras com contaminante, não foi evidente um padrão de comportamento.

O processo de biodegradação além de provocar uma redução na concentração de contaminante no solo, provoca alterações na granulometria do solo, tornando-a mais fina. Em solos com maior concentração de argila, a resistividade indicou padrões mais claros de variação reportados na literatura.

Por fim, o método desenvolvido na presente pesquisa, para avaliação da biodegradação por meio da resistividade do solo, provou-se ser eficiente na detecção de padrões de solo contaminado descritos na literatura, podendo ser empregado futuramente em estudos de contaminação de diferentes solos por diferentes contaminantes

7 SUGESTÃO DE ESTUDOS FUTUROS

A utilização de métodos geofísicos na detecção de contaminações tem se tornado uma opção aos métodos diretos de prospecção, como a sondagem, tendo em vista a sua rapidez e baixo custo. Com isso, a necessidade de estudos em laboratório e que fornecem informações preliminares que podem ser utilizadas em pesquisas *in situ* tem se tornado maiores.

Alguns estudos podem ser realizados no futuro com o objetivo de avaliar a influência de outros fatores que não foram abordados na presente pesquisa e que podem ter influência na resistividade do solo, como, o tipo de solo (latossolo, argissolo, neossolo, cambissolo), a porosidade, o tipo de poluente (gasolina, elementos traços) e a granulometria do solo ao longo do tempo (estudar o comportamento da granulometria no interior das amostras ao longo do tempo).

Outra sugestão é utilizar os mesmos fatores abordados na presente pesquisa, tendo em vista que, é possível usar outras variações de granulometria, teores de umidade, concentrações de contaminante e tempo.

É possível também realizar um estudo que avalie a contaminação do solo por óleo diesel ao longo do tempo e nessa pesquisa seria feita uma análise para comprovar a existência de uma relação entre a biodegradação do hidrocarboneto e a variação da resistividade do solo contaminado. Para cada uma das amostras que possuem em sua composição óleo diesel seria feita uma análise quantitativa dos hidrocarbonetos totais do petróleo (HTP) antes e após as análises geofísicas. Com isso, seria possível mensurar a quantidade de óleo diesel perdida por biodegradação natural ao longo do tempo. Essas análises seriam feitas utilizando a técnica de cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas.

E já que o objetivo principal de um estudo em laboratório é fornecer dados para a realização de pesquisas em campo, então, outra opção de estudo futuro é realizar testes *in situ*, em um local contaminado e concomitantemente realizar testes em laboratório com o mesmo solo, contaminante e teores de umidade medidos em campo e fazer uma comparação dos dados de resistividade obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Define os termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica de fundações e obras de terra.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016b.

_____. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016c.

ABDEL AAL, G. Z.; SLATER, D. L.; ATEKWANA, E. A. Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. **Geophysics**, v. 71, n. 2, p. H13–H24, 2006.

ABIDIN, M. H. Z.; SAAD, R.; WIJEYESEKERA, D. C.; AHMAD, F.; BAHARUDDIN, M. F. T; TAJUDIN, S. A. A.; MADUN, A. The Influences of Basic Physical Properties of Clayey Silt and Silty Sand on Its Laboratory Electrical Resistivity Value in Loose and Dense Conditions. **Sains Malaysiana**, v. 46, n. 10, p. 1959–1969, 2017.

ABU-HASSANEIN, Z. S.; BENSON, C. H.; BLOTZ, L. R. ELECTRICAL RESISTIVITY OF COMPACTED CLAYS. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 5, p. 397–406, 1996.

ALEGRIA, F.; MARTINHO, E.; ALMEIDA, F. Measuring soil contamination with the time domain induced polarization method using LabVIEW. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 42, n. 7, p. 1082–1091, 2009.

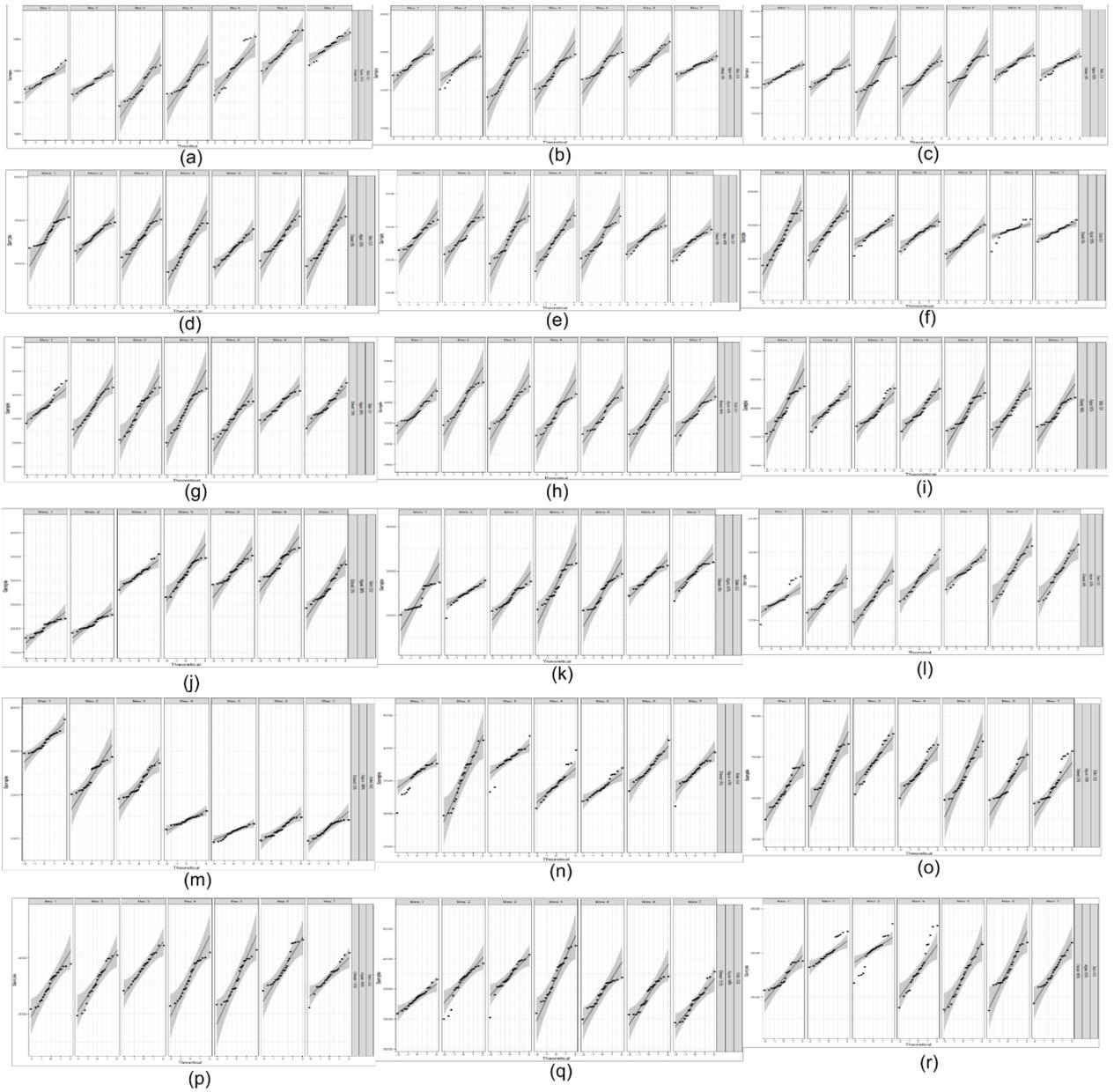
ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.15, n.2, p.111–116, 2011

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico do petróleo, gás natural e biocombustíveis**, p. 264, 2018.

ATEKWANA, E. A.; ATEKWANA, E. A. Geophysical Signatures of Microbial Activity at Hydrocarbon Contaminated Sites: A Review. **Surveys in Geophysics**, v. 31, n. 2, p. 247–283, 4 mar. 2010.

APÊNDICE 1

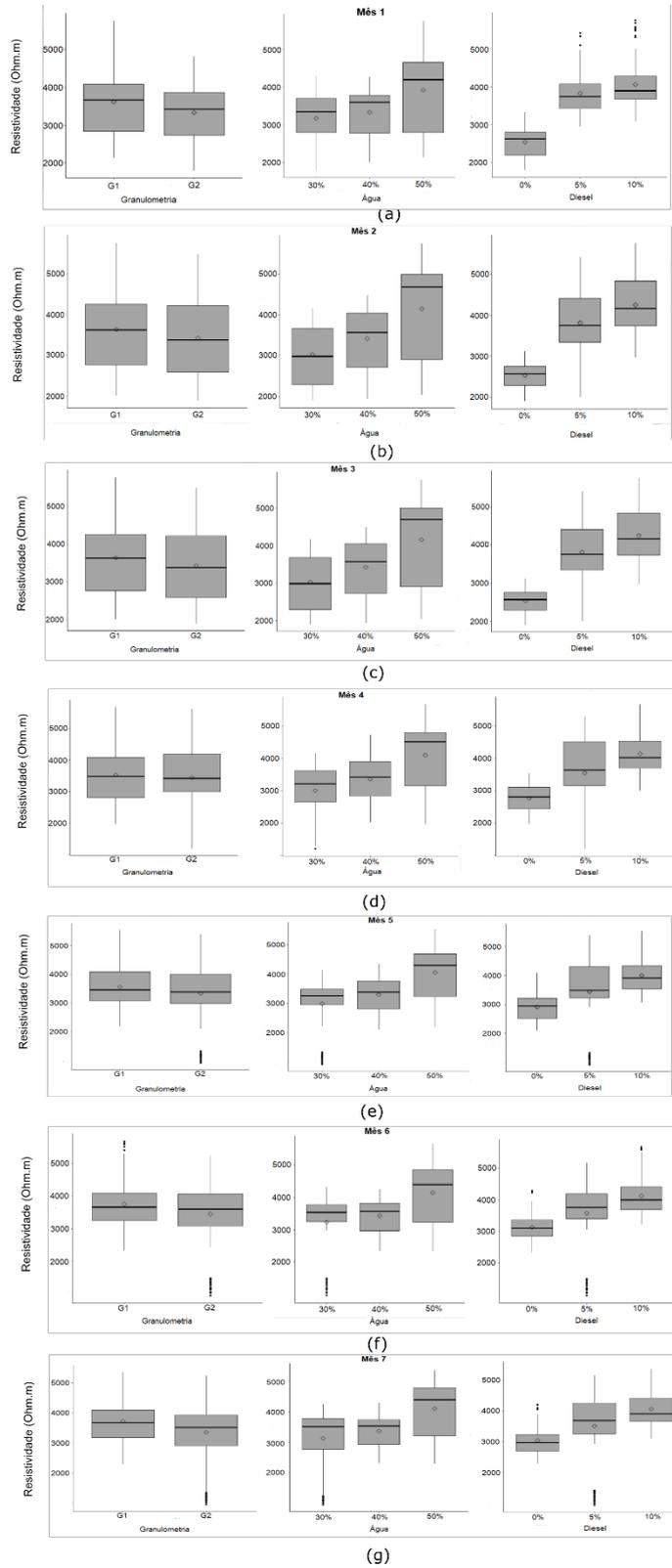
Normalidade de todos os dados



Fonte: Autor

APÊNDICE 2

Boxplots da variação da resistividade influenciada pela granulometria, teor de umidade e concentração do contaminante: a) Mês 1, b) Mês 2, c) Mês 3, d) Mês 4, e) Mês 5, f) Mês 6 e g) Mês 7



Fonte: Autor

APÊNDICE 3

Boxplots de todos os cenários durante os 7 meses

