



Universidade Federal do Amapá  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais



ALCIDES FROES DIAS JÚNIOR

**ELETORRESISTIVIDADE E ATRIBUTOS DO SOLO EM FLORESTA COM  
CASTANHEIRAS NA RESERVA EXTRATIVISTA DO RIO CAJARI**

MACAPÁ - AP  
2020

ALCIDES FROES DIAS JÚNIOR

**ELETORRESISTIVIDADE E ATRIBUTOS DO SOLO EM FLORESTA COM  
CASTANHEIRAS NA RESERVA EXTRATIVISTA DO RIO CAJARI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), sediado na Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Marcelino Carneiro Guedes (pesquisador da Embrapa AP)

MACAPÁ - AP

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá

Elaborada por Cristina Fernandes – CRB-2/1569

---

Dias Júnior, Alcides Froes.

Eletrorresistividade e atributos do solo em floresta com castanheiras na reserva extrativista do rio cajari / Alcides Froes Dias Júnior; Orientador, Marcelino Carneiro Guedes. – Macapá, 2020.

83 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

1. Plantas e solo. 2. Solos - Análise. 3. Solos - Propriedades elétricas. I. Guedes, Marcelino Carneiro, orientador. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

338.1 D541e

---

CDD. 22 ed.

MACAPÁ - AP

2020

ALCIDES FROES DIAS JÚNIOR

**ELETORRESISTIVIDADE E ATRIBUTOS DO SOLO EM FLORESTA COM  
CASTANHEIRAS NA RESERVA EXTRATIVISTA DO RIO CAJARI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), sediado na Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Aprovada em 30 de agosto de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**



Dr. Marcelino Carneiro Guedes

Membro Presidente



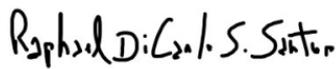
Dr. Helyelson Paredes Moura

Membro Titular



Dr. Nilson dos Santos Ferreira

Membro Titular



Dr. Raphael Di Carlo Silva dos Santos

Membro Titular



Alcides Froes Dias Júnior

Mestrando

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo.

Ao CNPq, pela bolsa durante o tempo em que percorri a jornada, ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), pela oportunidade em desfrutar de disciplinas, as quais contribuíram para meu conhecimento.

Aos excelentes professores, que foram determinantes para minha formação.

Aos membros da banca de qualificação (Dr. Alan Ubaiara e Dr. Helyelson Paredes) e banca da defesa (Dr. Nilson Ferreira, Dr. Raphael Di Carlo, Dr. Helyelson Paredes e Dr. Temístocles Raphael Sobrinho), que se dispuseram a contribuir para melhoria dessa dissertação.

Agradeço à Embrapa Amapá pelas excelentes oportunidades que me dispuseram e pelas viagens de campo, que foram essenciais para chegar aos resultados dessa pesquisa. Agradeço também a toda comunidade da Resex Cajari, pois foram de suma importância para a conclusão dessa pesquisa. Aos que contribuíram para a submissão do artigo. Aos meus amigos de classe, com os quais tive oportunidades de fazer inesquecíveis amizades e dividir conhecimento, em especial: Daniel Alves, Liana Belúcio, Jorge Ângelo, Roger Silfer, Éder Batista.

Aos amigos que fiz na Embrapa: Felipe Felix, Edglei, João Nelson, Gabriel, Claudeci, Carlão, Thamires. Agradeço em especial ao meu orientador, Marcelino Guedes, o qual foi fundamental e me ajudou muito com o desenvolvimento desta pesquisa, estando sempre à disposição, inclusive em momentos que não envolviam a pesquisa.

Ao meu grande amigo e professor Dr. Helyelson, o qual me repassou grandes conhecimentos. A minha mãe e ao meu pai, meu sogro e minhas cunhadas, e principalmente a minha namorada Anne Soledade, que sempre me apoiou e me deu forças para que alcançasse meus objetivos e teve um papel fundamental para que eu chegasse até aqui.

Agradeço a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para eu almejar e alcançar esse título.

**MUITO OBRIGADO!!**

## RESUMO GERAL

DIAS, JUNIOR, A. F.

### **ELETORRESISTIVIDADE E ATRIBUTOS DO SOLO EM FLORESTA COM CASTANHEIRAS NA RESERVA EXTRATIVISTA DO RIO CAJARI**

Macapá, 2020. Dissertação – Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento,

Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2018.

O estudo da resistividade elétrica do solo pode ser utilizado para entender a variação de acúmulo de água em florestas e culturas. O conteúdo de umidade é um fator fundamental para a manutenção de ecossistemas, principalmente, durante a época de baixa precipitação, quando se torna crítica à manutenção de processos vitais, como a absorção de nutrientes. Esse processo depende, principalmente, de raízes finas e das interações com outros atributos do solo, como textura e matéria orgânica. Todos esses fatores estão intrinsecamente interligados e podem ser relacionados à resistividade do solo, sendo importantes para a manutenção da qualidade edáfica e para subsidiar estudos nutricionais da vegetação e de espécies como a castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonp.), que necessita de elevados aportes de nutrientes para sua manutenção. Com o objetivo de analisar a resistividade elétrica do solo e se ela é sensível às variações em períodos climáticos distintos (inverno e verão amazônico), foram realizados dois testes de eletrorresistividade em cada período. O método geofísico eletrorresistividade também foi utilizado para avaliar como atributos da fertilidade (umidade, matéria orgânica, argila e areia) estão correlacionados com a resistividade elétrica e o acúmulo de raízes finas na camada mais superficial do solo. O estudo foi realizado na Reserva Extrativista do rio Cajari – Resex Cajari – AP. Os resultados mostraram que a variação da resistividade elétrica do solo modifica-se de acordo com o período sazonal, tendo uma diminuição da resistividade relacionada ao aumento da precipitação pluviométrica. A média geral de resistividade no inverno amazônico foi de 1264  $\Omega$ .m e no período mais seco do verão amazônico foi de 2108  $\Omega$ .m. As camadas mais próximas da superfície do terreno, até uma profundidade de 0,25 m, são mais sensíveis às alterações climáticas. A capacidade de investigação horizontal da técnica não invasiva e do arranjo de eletrodos utilizados mostraram-se promissores para estudos da umidade das porções mais rasas do solo em floresta com castanheira-da-amazônia, relacionados à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem biogeoquímica de nutrientes. No período de inverno amazônico, as áreas onde ocorreram menores valores de resistividade também apresentaram maior concentração de raízes finas. Com os resultados obtidos foi possível verificar fatores positivos e fortemente associados à variação de resistividade, como

os teores de matéria orgânica e argila. A resistividade foi menor nos pontos onde ocorreu uma maior concentração desses atributos. Assim, foi possível demonstrar que o método geofísico eletrorresistividade é eficaz para detectar áreas de baixa resistividade em ambientes florestais, propiciando pontos de coletas mais precisos e formas indiretas para avaliar importantes atributos ligados à sua qualidade, sem agredir o solo local.

Palavras Chave: resistividade, caminhamento elétrico, castanheira-da-amazônia, água no solo, raízes finas.

## ABSTRACT

DIAS, JUNIOR, A. F

### **ELECTRORESISTIVITY AND SOIL ATTRIBUTES IN FOREST WITH BRAZIL NUT TREES IN THE CAJARI EXTRACTIVE RESERVE**

Macapá, 2020. Dissertação – Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2018.

The study of the electrical resistivity of the soil can be used to understand the behavior of water accumulation in forests and crops. The humidity content is a fundamental factor for the maintenance of ecosystems, especially during the low precipitation season, when the maintenance of vital processes as nutrient absorption becomes critical. This process depends mainly of the fine roots, and interactions with other soil attributes such as texture and organic matter. All of these factors are intrinsically interconnected and can be related to soil resistivity, being important for the maintenance of soil quality and to support nutritional status of vegetation such as the brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonp.), that requires high amounts of nutrients for their maintenance. In order to analyze the electrical resistivity of the soil and if it is sensitive to variations in different weather cycles (amazonian winter and summer), two electroresistivity tests were performed in each weather cycle. The geophysical electroresistivity method was also used to clarify how fertility attributes (humidity, organic matter, clay and sand) are correlated with electrical resistivity and the accumulation of fine roots in the topsoil layer. The study was performed in the Cajari River Extractive Reserve - Resex Cajari - AP. The results have shown that the variation in the soil electrical resistivity changes according to the weather cycle, with a decrease in resistivity related to the increase in rainfall. The general resistivity average in the amazonian winter is 1264  $\Omega$ .m and it is 2108  $\Omega$ .m. in the driest period of the amazonian summer. The land surface layers, up to a depth of 0.25 m, are more sensitive to weather change. The horizontal investigation capacity of the non-invasive technique and the arrangement of electrodes proved to be promising for studies of the humidity of the shallower portions of the soil in a forest with brazil nut tree, related to the decomposition of organic matter and the biogeochemical cycling of nutrients. In the amazonian winter period, the areas where lower resistivity values have been measured also showed a higher concentration of fine roots. The results have shown the possibility to verify positive factors strongly associated with the variation of resistivity, as the contents of organic matter and clay. Where I have found a great concentration of these attributes, the resistivity values were low. Therefore, it was possible to demonstrate that the electroresistivity geophysical method is effective to detect areas of low resistivity in forest environments, providing more accurate data and indirect ways to assess important attributes related to their quality, without harming the local soil.

Keywords: Resistivity, electrical walking, amazon nut tree, , soil water, fine roots.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>11</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1 Método Geofísico da Eletrorresistividade	13
2.2 Técnica Caminhamento Elétrico (CA)	17
2.3 Tipos de arranjo	18
2.4 Arranjo Dipolo-Dipolo (D-D)	19
2.5 Relação entre raízes finas e umidade do solo	21
2.6 A castanheira-da-amazônia	23
<b>3. PERGUNTAS E HIPÓTESES</b>	<b>24</b>
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>25</b>
Geral	25
Específicos	25
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>26</b>
<b>Capítulo 1- Variação sazonal da resistividade elétrica de solo sob floresta com castanheiras (<i>Bertholletia excelsa</i> Bonp.), em reserva extrativista na Amazônia oriental</b>	<b>32</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>34</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>35</b>
2.1- Área de Estudo e Delineamento Amostral	35
2.2- Coleta e análises de dados da resistividade elétrica	38
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>40</b>
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 2- Relações entre resistividade do solo sob floresta com castanheiras (<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl), biomassa de raízes finas e atributos da fertilidade</b>	<b>55</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>57</b>

<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>60</b>
<b>2.1- Área de Estudo</b>	<b>60</b>
<b>2.2- Coleta de raízes finas e solos</b>	<b>63</b>
<b>2.3- Coleta de dados da resistividade elétrica</b>	<b>66</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>69</b>
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A quantidade de água armazenada no solo cumpre um importante papel na interação solo-planta-atmosfera. O estudo e monitoramento desta variável é relevante para o entendimento de como a sazonalidade do ambiente pode alterar características do solo sob florestas, como a fertilidade e evapotranspiração. Assim, o conteúdo de umidade é um fator fundamental para a manutenção de ecossistemas, principalmente durante a época de baixa precipitação, quando se torna crítica à manutenção de processos vitais, como a absorção de nutrientes. Além disso, é um fator indispensável para o entendimento de muitos processos hidrológicos que estão envolvidos em elevada variedade de sistemas naturais, atuando em diferentes escalas espacial e temporal (ENTIN et al., 2000; ALVALÁ et al., 2002).

No estudo da quantificação da umidade do solo, a estimativa desse parâmetro a partir de modelos matemáticos depende de funções de representações, sujeitas a erro de parametrização (MÁXIMO; SAAD; KUX, 1999). Além disso, a estimativa em escala regional, usando medidas pontuais de campo, encarece os custos, sendo necessários tempo e esforço elevados (WOOD, 1991; LAKSHMI; WOOD; CHOUDHURY, 1997). Assim, torna-se necessário pesquisar métodos indiretos não invasivos, que possam realizar essa medição de maneira mais econômica e com possibilidade de aplicação em larga escala.

A medição de umidade do solo por observações de satélites com sensores na faixa de micro-ondas é útil para estimativa regional (MÁXIMO; SAAD; KUX, 1999). Outros estudos têm apontado que o teor de umidade do solo pode ser inferido a partir de dados de resistividade elétrica do solo por meio de medidas obtidas pelo método eletrorresistividade (JAYAWICKREME; VAN DAM; HYNDMAN, 2008). Esses autores quantificaram as diferenças na captação de umidade da zona radicular em floresta e na zona vadosa de solo de clima frio, concluindo que é possível obter informações significativas sobre as interações entre a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera.

A umidade também pode aumentar a produção de raízes pelas plantas (SILVER et al., 2000). Algumas espécies são capazes de produzir elevadas quantidades de raízes finas, cujo comprimento pode atingir quilômetros de distância. Dentre essas espécies, encontra-se a castanheira-da-amazônia, que pode desenvolver um sistema radicular pivotante (5 a 10 m) bastante profundo (MULLER, 1995). A castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é uma espécie natural da região amazônica, que possui grande porte, podendo alcançar ou até mesmo

passar dos 50 m de altura e 3 m de diâmetro (DUCKE E BLACK 1954, SALOMÃO et al., 2006).

A importância das raízes finas nos processos biogeoquímicos em ecossistemas florestais já foi demonstrada (SILVER et al., 2005). No entanto, há poucos estudos para entender a produção dessas raízes devido às dificuldades metodológicas na parte subterrânea dos ecossistemas florestais. O conhecimento do sistema radicular e das raízes finas ainda é reduzido, apesar da sua importância para entender processos ecofisiológicos, principalmente, aqueles relacionados com a nutrição mineral e umidade (GONÇALVES E MELLO, 2000).

Quando se fala em desenvolvimento, as castanheiras apresentam padrões de crescimento de diâmetro e altura diferentes, relacionados a distintas condições ambientais (SCHONGART, 2015). O habitat preferencial desta espécie está relacionado com solos não alagados. Devido ser uma espécie nativa da região amazônica, a castanheira precisa de clima quente e úmido, bem como de luz para se desenvolver (NEVES 1938, MULLER et al., 1980).

O conhecimento dos atributos do solo como o teor de matéria orgânica e umidade presente no mesmo, e da biomassa de raízes e sua distribuição, é um importante aspecto para entender o funcionamento do ecossistema (WITSCHORECK et al., 2003). Esse conhecimento auxilia no entendimento das relações existentes entre as raízes, a parte aérea das plantas e as características edáficas aos padrões de absorção de água e nutrientes por parte dos indivíduos (SAINJU E GOOD, 1993). No caso das raízes finas, estudadas nesse trabalho, sua maior importância está diretamente relacionada com a absorção dos nutrientes, na medida em que os mesmos não são absorvidos pelas raízes grossas (WITSCHORECK et al., 2003).

Devido à escassez de estudos relacionados à parte subterrânea dos ecossistemas florestais sob influência da sazonalidade e ao desenvolvimento das raízes, estudos geofísicos podem ser eficientes para averiguar se a baixa resistividade do solo pode influenciar a produção de raízes finas. O método de eletrorresistividade, cujo parâmetro físico inerente é a resistividade elétrica, é um método de geofísica rasa, não invasivo. O caminhamento elétrico é um sub-método da eletrorresistividade, e pode ser aplicado utilizando arranjos de eletrodos, como o dipolo-dipolo e Wenner, na pré-avaliação das propriedades físicas e químicas de solos sob florestas ou cultivados. É muito útil na agricultura de precisão, para mapear características de pequena e/ou grande escala dentro do perfil do solo (BESSON et al., 2004; AL HAGREY, 2007; REYNOLDS, 2011).

São vários os fatores que podem influenciar a resistividade do solo: a classe de solo, a mistura de diversos tipos de solo, os solos constituídos por camadas estratificadas com espessuras e

materiais diferentes, o teor de umidade, a temperatura, a compactação e pressão, a composição química dos sais dissolvidos na água retida (KINDERMANN et al., 1995; REYNOLDS, 2011). Além disso, a resistividade do solo acompanha os períodos de estiagem e chuva de uma região. Em estudo com a técnica do caminhamento elétrico (CE), e arranjo dipolo-dipolo, para avaliação da precipitação pluviométrica em pesquisas arqueológicas, os resultados indicaram maiores valores de resistividade associado ao período menos chuvoso, e menores no período mais chuvoso (ALBUQUERQUE, 2016).

A delimitação espacial na área investigada de locais com presença de anomalias de resistividade elétrica em subsuperfície permite inferir sobre posições para procedimentos de coletas de amostras, principalmente de propriedades físicas como a umidade e compactação. Essas informações são importantes para tomadas de decisões no manejo da área quanto a intervenção sobre nutrientes, defensivos agrícolas e irrigação. Assim, a geofísica permite a identificação e caracterização de parâmetros físicos do solo de maneira indireta em diferentes espaços e tempos.

Nesse trabalho, o método geofísico eletrorresistividade, utilizando-se a técnica do caminhamento elétrico com o arranjo de eletrodos dipolo-dipolo, foi utilizado para avaliar como os atributos de fertilidade (umidade, matéria orgânica, argila e areia) estão correlacionados com a resistividade elétrica e o acúmulo de raízes finas no solo. O trabalho foi desenvolvido em uma área de floresta ombrófila com presença de castanheiras-da-amazônia, situada na Reserva Extrativista do Rio Cajari, uma Unidade de Conservação federal de uso sustentável na Amazônia oriental.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Método Geofísico da Eletrorresistividade**

O método da eletrorresistividade destaca-se por ser um método não invasivo. Por meio dele é possível determinar no subsolo a existência de corpos minerais e identificar estruturas geológicas (REYNOLDS, 2011).

Na prospecção elétrica utiliza-se, em geral, três propriedades fundamentais: a) resistividade: define a quantidade de corrente elétrica em uma camada quando aplicado uma diferença de potencial; b) constante dielétrica: define a capacidade de armazenamento de cargas elétricas nos materiais, geradas pela introdução de corrente alternada de alta frequência no subsolo; c) atividade eletroquímica da rocha: responsável pelo aparecimento de correntes elétricas naturais geradas sem qualquer influência dos campos elétricos artificiais. Vale ressaltar que o

método pode ser utilizado tanto para estimar tanto a distribuição lateral quanto a vertical, da resistividade elétrica, devido ao aumento da profundidade (GALLAS, 2000).

O método da eletrorresistividade (Figura 1) consiste em empregar uma corrente elétrica artificial no solo através de eletrodos (eletrodos de corrente A e B). A diferença de potencial que é obtida em resposta a tal injeção pode ser medida por outros dois eletrodos situados nas proximidades (eletrodos de potencial M e N). Obtendo-se os valores de corrente e as diferenças de potenciais, é possível determinar o grau de resistividades elétrica do alvo em questão (GALLAS, 2000).

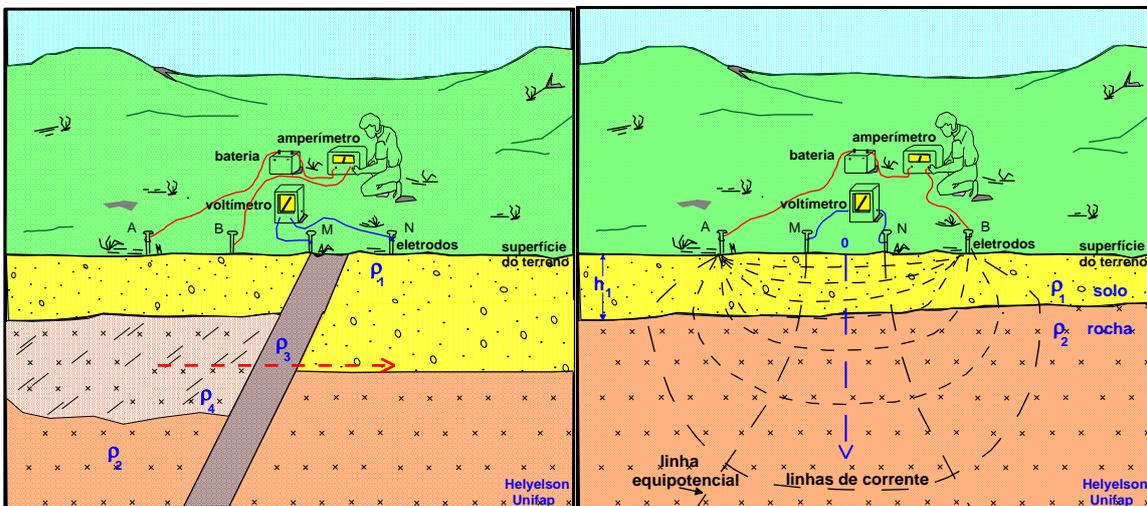


Figura 1-Exemplo da aplicação do método da eletrorresistividade em uma investigação lateral (à esquerda) e vertical (à direita). Fonte: Moura (2018).

O método tem uma vasta aplicação em geociências (geologia básica, hidrogeologia, mineração, meio ambiente e geologia de engenharia). A eletrorresistividade apresenta melhor desempenho se comparada aos métodos do potencial espontâneo (SP) e polarização induzida (ELIS, 2002),

Diferentes ambientes apresentam propriedades fundamentais para obter parâmetros físicos de resistividade elétrica, servindo para caracterizar estados em termos de alteração, faturamento, saturação, entre outros (GALLAS, 2000). Quando se obtém informação da intensidade da corrente elétrica transmitida, da diferença de potencial medida e do conhecimento da geometria de distribuição dos eletrodos de corrente e de potencial, pode-se estimar a resistividade elétrica aparente ( $\Omega$ -ohm.) abaixo da superfície do terreno, utilizando a Lei de Ohm, que é dada por:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K$$

Equação (1): lei de ohm (KELLER e FRISCHKNECHT, 1977).

Onde  $I$  é a corrente elétrica em ampère (A),  $\Delta V$  é a medida da diferença de potencial em Volt (V),  $\rho_a$  é a resistividade aparente e  $K$  é o fator geométrico do arranjo ((REYNOLDS, 1997). A resistividade aparente não é a resistividade exata de uma litologia e sim uma média da resistividade de várias rochas caso o meio fosse homogêneo. Ela reflete somente a propriedade do meio onde a corrente passou.

O método da eletrorresistividade possui sub-métodos como o caminhamento elétrico (CE), a sondagem elétrica vertical (SEV) e a perfilagem elétrica. Dentre esses sub-métodos, diferentes arranjos de eletrodos de corrente e de potencial podem ser utilizados em campo. como o dipolo-dipolo e Wenner. Cada sub-método é utilizado de acordo com o alvo a ser investigado e segue um procedimento específico de campo para se obter o parâmetro físico de resistividade elétrica aparente e o parâmetro  $K$ , que é uma constante em função do arranjo de eletrodos. (MOURA, 2018).

A sondagem elétrica vertical visa investigar variações de resistividade elétrica com a profundidade efetuadas na superfície do terreno a partir de um ponto fixo. O caminhamento elétrico busca investigar variações de resistividade laterais com as profundidades determinadas, efetuadas na superfície do terreno. Em se tratando de perfilagem elétrica, ocorre a investigação tanto em áreas laterais quanto verticais, efetuadas no interior de furos de sondagens mecânicas (BRAGA, 1997).

Os arranjos mais utilizados no método da eletrorresistividade, são: gradiente, dipolo-dipolo, polo-dipolo, Schlumberger e Wenner. A escolha do arranjo deve estar vinculada ao alvo a ser investigado (BRAGA, 1997). Nesse trabalho, optou-se pela aplicação da técnica do caminhamento elétrico e do arranjo dipolo-dipolo, pois a pretensão maior era a investigação lateral em menores profundidades do solo.

Na literatura científica muitos trabalhos relatam a utilização de métodos geofísicos em diversas aplicações. Através do caminhamento elétrico e do arranjo Dipolo-Dipolo foi possível obter a caracterização de litologias de uma área saturada com risco de contaminação no município de Rio Claro-SP (BRAGA, 1997).

Estudo aplicando a tomografia de resistividade elétrica foi utilizado para averiguar o conteúdo de água no solo em uma área de cultura agrícola no Kansas EUA. A pesquisa teve como

objetivo verificar a relação entre o solo saturado de argila e a grande produção naquela área. Os pesquisadores concluíram que no baixo relevo saturado por argila, era possível verificar uma maior produção que as demais áreas. Além de perceberem que o método da eletroresistividade é uma ferramenta significativa para ser utilizada no aperfeiçoamento de manejo de produção agrícola em relação ao solo (MATHIS et al., 2018).

Zonas de saturação são sempre visadas para ensaios geofísicos. O método da eletrorresistividade foi aplicado para identificar zonas saturadas com o objetivo de caracterizar a dinâmica de produção de uma espécie de planta em relação à umidade do solo em uma lagoa de Veneza (Itália). Os autores, se utilizando do método da eletroressitividade, conseguiram indetinficar áreas com o teor de umidade elevado abaixo da superfície. Tais áreas favoreciam o desenvolvimento dessa espécie pois no ambiente úmido a transpiração ocorria a uma taxa mais elevada favorecendo o crescimento (BOAGA et al., 2014).

Estudos demonstram que as medidas de resistividade elétrica podem fornecer um meio não destrutivo, para avaliar a qualidade das camadas compactadas do solo. Alta resistividade pode ser um indicativo de baixo teor de água, de alta porosidade, ou alto teor de areia ou cascalho (KALINSKI E KELLY 1993),

Para ter um maior entendimento do perfil do solo e dos aspectos abaixo da camada superficial de serapilheira, presente em florestas, a eletrorresistividade pode ser utilizada para compreender as características de uma cultura ou reflorestamento, em relação ao desenvolvimento de raízes. Também pode ser utilizada na caracterização hidrogeológica, como profundidade do nível freático, determinação das espessuras dos estratos geológicos e localização de zonas de solos saturados por água (AMATO et al., 2008; REYNOLDS, 2011).

Através da modelagem pelo processo de inversão de dados de resistividade elétrica, foi demonstrado como é possível visualizar o progresso de uma pluma de água em Latossolo e comprovar um aumento progressiva da umidade do solo, relacionada à área de baixa resistividade (SILVA e NASCIMENTO, 2013). Esses resultados evidenciaram a aplicabilidade do método de eletrorresistividade para visualização do avanço da umidade do solo em um período de quatro horas.

A tomografia por resistividade elétrica já foi utilizada para realizar o estudado não invasivo de raízes de árvores, verificando sua distribuição espacial em um solo agrícola (AMATO et al., 2010). Nesse trabalho foi possível verificar que as raízes se concentram próximas ao tronco, alcançando valores de resistividade de até 460  $\Omega$ .m, onde as respostas mais resistivas se deram em raízes mais “grossas”.

Assim, a Geofísica, por meio do método da eletrorresistividade, pode contribuir para estudos no intuito de entender o comportamento da resistividade do solo e relacionar a umidade com a produção de raízes finas. Em solos consideravelmente úmidos, ocorre a condução de corrente em decorrência de fatores como, por exemplo, a salinidade, gerada por íons nas micelas e na solução do solo. A presença de cátions trocáveis associados com minerais de argila pode deixar o solo com menor resistividade - argila com 40% de umidade pode ter resistividade de  $80 \Omega.m$  (BOSZCZOWSKI, 2008). Logo, estes fatores são indicativos de umidade, o que corrobora com o método quando se fala em indicar zonas de menor resistividade abaixo da vegetação.

## **2.2 Técnica Caminhamento Elétrico (CA)**

Nos últimos anos, o caminhamento elétrico vem sendo empregado de maneira sistêmica (YAMASAKI, 2012). A técnica do caminhamento elétrico tem como objetivo realizar o mapeamento lateral da resistividade. A técnica consiste em alocar os eletrodos em pontos seguintes, a cada medição, mantendo fixa a distância entre as hastes, onde a condutividade elétrica se dá no ponto central do arranjo utilizado. Para a aplicação do caminhamento elétrico é necessário fixar o espaçamento entre os eletrodos (Figura 2) para obtenção das leituras pertinentes em um mesmo nível. Então, todo o arranjo será deslocado para a posição seguinte e serão efetuadas as leituras de resistividade aparente correspondentes (TELFORD W.M. e GELDART, 1990).

As investigações feitas através da técnica do caminhamento elétrico limitam-se a cinco ou no máximo seis níveis de investigação, podendo utilizar variados arranjos. A densidade de informações na direção vertical é geralmente mais difícil em ser observado do que quando se trata de uma variação horizontal, o que gera menos precisão quanto à profundidade dos alvos em subsuperfície (PACHECO, 2004).

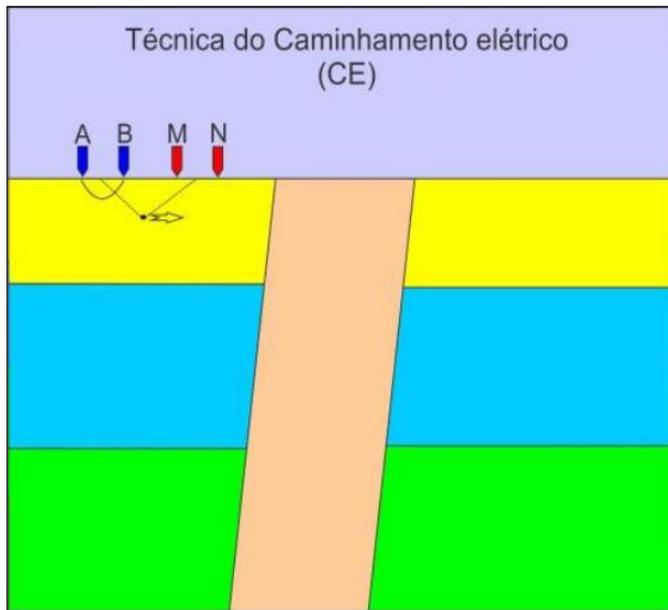


Figura 2 – Disposição dos eletrodos em campo para aplicação da técnica de caminhamento elétrico  
Fonte: Modificado de Braga (1999).

Investigações geofísicas através de caminhamento elétrico foram realizadas no interior do Estado de São Paulo, Brasil, em áreas que apresentavam situações críticas quanto à presença de camada de solo altamente permeável. Foram avaliados dois tipos de arenitos que compõem importantes aquíferos subterrâneos no interior do Estado (HAMADA et al., 2002).

Um exemplo de aplicação da técnica de caminhamento elétrico na prospecção de água subterrânea em terrenos cristalinos foi dado em Gallas (2003). O estudo discorre sobre o fato de que este tipo de levantamento, em que se procura identificar anomalias que tenham correlação a zonas de fraturas no maciço rochoso. Nesse caso, a abertura entre os eletrodos deve ser tal que o primeiro ou segundo nível de investigação ultrapasse a camada correspondente ao solo e rocha alterada. No estudo feito pelo autor foi utilizado o arranjo Dipolo-Dipolo com o espaçamento entre os eletrodos de 40 m.

### 2.3 Tipos de arranjo

O método da eletrorresistividade admite o emprego de várias possibilidades de arranjos de eletrodos (ORELLANA, 1972; OWEN, 1983). No entanto, são poucos os arranjos que vêm sendo efetivamente utilizados pelo meio técnico. As principais características dos dispositivos eletródicos convencionais já são bem conhecidas, isso se deu devido a ampla abundância de estudos relacionados a modelos sintéticos e comparações de dados adquiridos em campo utilizando-se diversos destes arranjos.

A escolha de qual arranjo empregar está sujeita a uma série de fatores: o tipo de alvo que será estudado (este fator está relacionado com o padrão de sensibilidade de cada arranjo para

as variações horizontais e verticais da resistividade em subsuperfície), a razão sinal/ruído, a profundidade de investigação desejada, entre outros fatores (GANDOLFO, 2007).

Abaixo, seguem exemplos de arranjos que podem ser utilizados para investigação (Figura 3). No entanto, nesse trabalho se descreve o arranjo Dipolo-Dipolo, um dos mais empregados e descritos na literatura (ZHOU e DAHLIN, 2003).

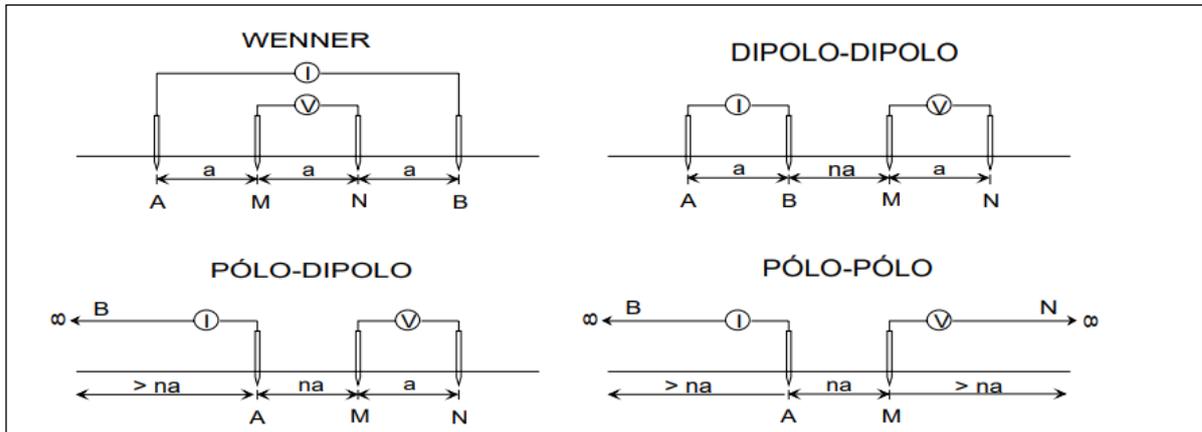


Figura 3- Modelos de arranjo para técnica de caminhamento elétrico, que podem ser empregados em campo (ZHOU e DAHLIN, 2003).

#### 2.4 Arranjo Dipolo-Dipolo (D-D)

O arranjo dipolo-dipolo pode ser utilizado em levantamentos associados ao caminhamento elétrico como a prospecção de água subterrânea, mineração e estudos ambientais. Devido a algumas de suas características, como por exemplo a facilidade operacional, esse se torna muito viável para aplicação em campo, (GALLAS, 2000).

A grande vantagem em se utilizar o arranjo Dipolo-Dipolo está no fato da simetria do mesmo, sendo mais fácil realizar a interpretação de uma pseudoseção, principalmente para se determinar com segurança a posição de uma anomalia. Ele pode ser caracterizado como “dispositivo dipolar axial, sendo algumas vezes referido como dipolo duplo ou Dipolo-Dipolo colinear. Neste arranjo os eletrodos são dispostos em linha e o espaçamento ou abertura entre os dois eletrodos de corrente e potencial permanece fixo durante todo o levantamento.

O arranjo dipolo-dipolo pode ser resumido com as seguintes características: o centro dos dipolos AB e MN deslocam-se ao longo da linha a ser levantada; o espaçamento entre os eletrodos AB é igual ao MN; e cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação.

A figura 4 demonstra como se monta o arranjo em campo ao longo de uma linha de aquisição. É possível observar vários dipolos MN instalados na superfície do terreno, onde

cada par MN representa um nível de investigação em relação ao par AB. Assim, quanto mais dipolos de MN forem instalados, maior será a profundidade de investigação. Entretanto, deve-se ressaltar que a voltagem, à medida que nos afastamos do dipolo AB, diminui sensivelmente e as leituras mais afastadas se tornarão difíceis de serem obtidas com precisão.

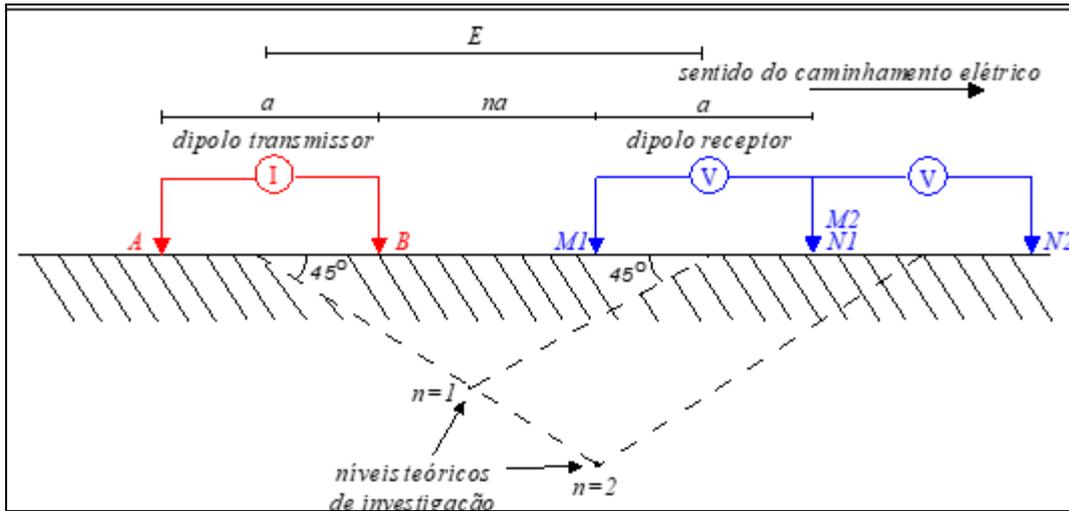


Figura 4- Disposição dos eletrodos em campo para aplicação do arranjo Dipolo-Dipolo.

A aquisição dos dados de campo consiste em executar uma série de medidas mantendo-se fixo o espaçamento dos dipolos AB e MN, aumentando-se a separação entre eles de acordo com um fator “na”. Cada um destes afastamentos corresponde a um nível de investigação em profundidade.

Quanto maior for a distância, maiores profundidades poderão ser alcançadas, tendo como alcance de valor aceitável as leituras de potencial superiores ao nível de ruído presente no local. Para a realização do caminhamento, todo o arranjo é deslocado de uma distância em regra igual a um espaçamento entre dipolos. Repetindo-se o procedimento anteriormente descrito, torna-se possível a construção de uma pseudoseção de resistividade elétrica aparente ao longo da linha do levantamento.

O arranjo Dipolo-Dipolo proporciona muitas vantagens quanto a sua utilização. A principal delas é o fato de se tratar de um arranjo simétrico, sendo mais simples o adequado posicionamento de uma anomalia na interpretação qualitativa de uma pseudoseção,

comparativamente aos demais arranjos. Outra vantagem está associada à sua facilidade operacional em campo (ZHOU e DAHLIN, 2003).

Outra característica a ser citada está em sua boa resolução lateral (horizontal). O arranjo Dipolo-Dipolo é o que apresenta a mais eficiente resolução como um todo, se comparado a outros arranjos (COGGON, 1973). No entanto, as anomalias são fortemente influenciadas por irregularidades da cobertura superficial.

Contudo, uma das desvantagens da aplicação do arranjo está vinculada a baixa razão sinal/ruído que ele apresenta, principalmente quando se torna grande a separação entre os pares de dipolos, podendo ser utilizado para mapeamentos de estruturas verticais não sendo indicado para realizar identificação de estruturas horizontais (WARD, 1990).

## **2.5 Relação entre raízes finas e umidade do solo**

As raízes finas possuem um diâmetro de até 2 mm, sendo um dos principais meios que as árvores utilizam para acessar os recursos do solo (WITSCHORECK et al., 2003). Seu comprimento e abundância são indicadores da capacidade de absorção de nutrientes (FREITAS et al., 2008). Quanto maior o enraizamento de uma planta, maior sua capacidade de explorar o solo e aproveitar os nutrientes e a água disponíveis (MEDINA et al., 2002). Estudo com raízes finas são de grande importância para entender os processos biogeoquímicos em ecossistemas florestais. No entanto, existem poucos estudos voltados para a produção dessas raízes (GRACE et al., 2001).

O comprimento das raízes finas tende a ser maior quando se encontram na camada superior, até 20 cm da superfície, pois as mesmas são concentradas na superfície do solo, reduzindo sua produção com aumento da profundidade. Isso acontece devido ao maior teor de matéria orgânica, aeração e disponibilidade de nutrientes nas camadas superficiais do solo (WITSCHORECK et al., 2003). Além do que, as camadas mais profundas tendem a apresentar solo mais adensado e presença de rochas (FABIÃO et al., 1987). Outro autor também relata que a maior concentração de raízes na camada superficial está relacionada ao microambiente favorável causado pela serapilheira, maior retenção de água, maior arejamento e, portanto, maior disponibilidade de oxigênio e nutrientes oriundos de sua decomposição (WITSCHORECK et al., 2003). Isso favorece o crescimento das raízes, principalmente as mais finas, pois a planta aloca essas raízes na camada mais superficial a fim de aproveitar essas condições.

As raízes modificam as características do solo quando liberam açúcares, ácidos orgânicos e compostos minerais de fósforo e potássio, contribuindo para a dissolução de substâncias minerais e para o desenvolvimento de microrganismos na rizosfera (CINTRA et al., 1999). Quando morrem e se decompõe dentro do solo, geram um ciclo de carbono influenciando, desse modo a manutenção da fertilidade (LEHMANN e ZECH, 1998; SCHROTH et al., 1999). Lehman e Zech (1998) e Schroth et al. (1999) mostram que enquanto de 10 a 20% da serrapilheira é transformada em matéria orgânica do solo, estes valores podem variar entre 20 e 50% quando se considera a renovação das raízes.

A distribuição e a densidade de raiz, dependem em primeiro lugar do tipo do sistema radicial e variam no decorrer do ano, devendo ressaltar que a propagação ocorre na época de chuvas. O teor de água do solo é de grande importância para a produção vegetal no processo de absorção de nutrientes. A água do solo é, provavelmente, o fator de maior influência. Além disso, sua escassez ou excesso afeta de maneira significativa o crescimento das plantas (LARCHER, 2000).

A influência de água no solo sobre o crescimento radicular pode não ser evidente devido a fatores como a sazonalidade da precipitação pluviométrica no local. Dessa forma, realizar experimentos para esclarecer mecanismos pelos quais ocorre a produção de raízes finas podem responder tal questão (YAVITT e WRIGHT, 2001). No entanto, tais estudos são escassos em florestas (SILVER et al., 2005). Logo, entender a relação entre umidade e quantidade de raízes finas no solo é de grande importância, pois este mecanismo é o principal responsável pela absorção de nutrientes e geração de energia para as plantas. Silver et al., (2000) demonstraram diferenças de produção de raízes finas em relação a profundidade em duas florestas no Pará. Eles mediram a produção de raízes na floresta de Caxiuanã na profundidade de 20 cm, percebendo que havia uma maior produção de biomassa nesta profundidade. Já Metcalfe et al., (2007), em uma floresta no rio Tapajós, mediram a produção na profundidade de 10 cm averiguando maior produção nessa área. Segundo os autores essa diferença de profundidade pode estar relacionada com as características do ambiente, já que as raízes finas são responsáveis pela absorção de nutrientes buscando áreas onde possam se propiciar desse fator, como áreas com maior teor de matéria orgânica ou umidade. Witschoreck et al. (2003), apresentaram que a camada superficial do solo possui maior disponibilidade de nutrientes para as árvores. Isso se dá devido a maior intensidade da ciclagem biogeoquímica. Tal fator pode estar relacionado com quantidade de raízes finas que podem ser encontradas a até 30 cm de profundidade. Por fim, Eissenstat et al. 1994

perceberam em sua pesquisa que quando a umidade do solo aumentou, houve produção de raízes finas e que conforme esta umidade diminuía as raízes finas desapareciam, na mesma proporção. Observaram também que os períodos com maior frequência de água no solo concordavam com os períodos de maior atividade de crescimento da parte aérea e de raízes.

## **2.6 A castanheira-da-amazônia**

A castanheira (*Bertholletia excelsa*) é uma espécie presente em toda a região panamazônica. Brasil, Bolívia e Peru são países considerados grandes produtores de castanha (BAYMA et al., 2014; THOMAS et al., 2014).

Na região sul do Estado do Amapá, é possível verificar elevada quantidade de castanheiras, abarcando os municípios de Vitória do Jari, Laranjal do Jari e Mazagão. Nessa região, diversas famílias locais desenvolvem a cultura do extrativismo da castanha em seus respectivos castanhais, como alternativa de renda e alimento para própria subsistência (NEVES et al., 2016). A castanheira é uma árvore de grande porte. Sua copa atinge alturas que variam entre 30 a 50 metros de altura podendo chegar a 60 m. A espécie vegeta em regiões de clima quente e úmido, porém a maior ocorrência de maciços (castanhais) é em áreas que apresentam período de estiagem definido (LOUREIRO, SILVA E ALENCAR, 1979).

Dinis e Bastos (1974) informam que a castanheira-da-amazônia é encontrada em áreas com médias anuais de chuvas de 1400 a 2800 mm, temperatura de 24 a 27° C e umidade relativa de 79 a 86%. Consequentemente, para que a castanha-da-amazônia possa desenvolver-se de forma adequada, é necessário um período de dois a cinco meses de poucas chuvas. A espécie pode ser encontrada em solos, bem estruturados e drenados, argilosos ou argilo-arenosos, sendo que sua maior ocorrência é naqueles de textura média a pesada (CLEMENT, 2002).

Estudos experimentais de curta duração e em condições diversas de intensidade de luz sugerem que as plântulas de *B. excelsa* têm melhor crescimento quando as condições luminosas são intermédias, entre 25-50% de abertura de dossel. Entretanto, os aumentos de biomassa são proporcionais à disponibilidade de luz (ZUIDEMA et al., 1999; HAYASHIDA-OLIVER et al., 2001).

Em estudo voltado para o manejo de castanha na Reserva Extrativista do Rio Cajari/AP, percebeu-se que a espécie também ocorre em ambiente de transição savana-floresta, inclusive, com maior densidade do que na área de floresta densa (NEVES et al., 2016). Segundo os autores, a variação na frequência de indivíduos pode estar relacionada com as características do local. Assim, diferentes ambientes podem favorecer ou não o desenvolvimento ou até mesmo a produção de frutos pela espécie (BATISTA et al., 2019)

Poucos estudos envolvendo o sistema radicular dessa espécie são encontrados. Estudos realizados na estrada do Carajás demonstraram que mesmo após o desmatamento da área, a castanheira continuava fixa em pé, concluindo que esta pode possuir um sistema radicular bastante profundo, pois não apresentam raízes tabulares que contribuiriam para sua fixação no solo (ROSA, 1986). Uma hipótese relacionada a isto está no fato de que essa espécie ocorre em áreas desmatadas onde são mantidas em pé de forma isolada, não havendo com frequência a queda da árvore nem por fortes ventos (CAMARGO, 1997).

A análise química do solo de plantio de castanheira-da-amazônia (Argissolo Vermelho Amarelo distrófico plúntico, textura argilosa), em Porto Velho, Rondônia, demonstrou que ela apresenta bom desenvolvimento em altura e diâmetro quando em solos com pH ácido, baixos valores de saturação de bases, solo distrófico, alta capacidade de troca de cátions e altíssimos valores de saturação de alumínio (LOCATELLI, VIEIRA e GAMA, 2005).

Visto isso, devido ao seu grande porte e essa desenvolver-se de forma mais rápida que outras espécies, em Roraima, a castanheira apresentou valores superiores para o diâmetro, a área de copa e profundidade de raiz, comparados com os da andiroba, o ipê-roxo e o jatobá (TONINI e ARCO-VERDE, 2005). Assim, busca-se entender se em locais com a presença de castanheira possa ocorrer uma grande concentração de massa de raiz fina em áreas de maior umidade, pois esta pode estar associada à sua própria necessidade de absorção de nutrientes e capacidade de desenvolvimento.

### **3. PERGUNTAS E HIPÓTESES**

- O método eletrorresistividade consegue mapear o efeito da sazonalidade no solo sob floresta com castanheira?
- A resistividade elétrica pode ser associada com a quantidade de raízes finas em áreas de floresta com castanheira? Como essas variáveis podem ser relacionadas com outros atributos do solo como teor de umidade e textura?

Tendo como hipóteses:

- O uso do método resistividade, utilizando a técnica do caminhamento elétrico, é eficaz para mapear áreas com baixa resistividade no solo sob florestas, sendo capaz de detectar diferenças em função da época do ano (mais chuvosa x menos chuvosa).
- A resistividade elétrica pode ser usada para detectar e avaliar áreas úmidas em solo sob floresta com castanheiras. Áreas mais úmidas e menos resistivas podem ser

associadas com microssítios mais argilosos e orgânicos, favorecendo o acúmulo de raízes finas nesses locais.

#### **4. OBJETIVOS**

##### **Geral**

- Utilizar a resistividade elétrica para o estudo do solo em ambientes de floresta com castanheiras (*Bertholletia excelsa*), em uma unidade de conservação de uso sustentável no sul do Amapá.

##### **Específicos**

- Analisar a resistividade elétrica do solo e se a mesma é sensível às variações em períodos climáticos distintos, utilizando-se a técnica do caminhamento elétrico, com o arranjo de eletrodos dipolo-dipolo.
- Fazer uso do método geofísico eletrorresistividade, para avaliar como os atributos de fertilidade (umidade, matéria orgânica, argila e areia) estão correlacionados com a resistividade elétrica e o acúmulo de raízes finas na área de estudo.

## REFERÊNCIAS

- AL HAGREY, S.A. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. **J. Exp. Bot.** 58:839–854. doi:10.1093/jxb/erl237, 200.
- ALVALÁ, R. C. S., GIELOW, R., ROCHA, H.R., FREITAS, H.C., LOPES, J.M., MANZI, A.O., RANDOW, C.VON., DIAS, M.A.F.S., CABRAL, O.M.R Intra diurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content and thermal properties under forest and pasture in Rondônia, **J. Geophys. Res.**, 107, 10.1029/ 2000JD000337, in press, 2002.
- AMATO M, BASSO B, CELANO G, BITELLA G, MORELLI G, ROSSI R In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. **Tree Physiol** 28:1441–1448. doi:10.1093/treephys/28.10.1441\_2008.
- AMATO, M., ROSSI, R., BITELLA, G., AND LOVELLI, S.: Multielectrode Geoelectrical Tomography for the Quantification of Plant Roots, *Ital. J. Agron./Riv. Agron.*, 3, 257–263, 2010.
- BATISTA, A.P.B., SCOLFORO, H.F., MELLO, J.M., GUEDES, M.C., TERRA, M.C.N.S., Scalon, J.D., Gomide, L.R., Scolforo, P.G.V., Cook, R.L., 2019. Spatial association of fruit yield of *Bertholletia excelsa* Bonpl. trees in eastern Amazon. *For. Ecol. Manag.* 441, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.043>.
- BAYMA M. M. A., F. W. MALAVAZI, C. P. DE SÁ, F. L. FONSECA, E. P. ANDRADE, AND L. H. O. WADT. Aspectos da cadeia produtiva da castanha-do-brasil no estado do Acre, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi** 9: 417-426, 2014.
- BESSON, A., COUSIN, I., SAMOUËLIAN, A., BOIZARD, H., & RICHARD, G. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. **Soil and Tillage Research**, 79(2), 239-249, 2004.
- BOAGA, J., A. D'ALPAOS, G. CASSIANI, M. MARANI, AND M. PUTTI, Plant-soil interactions in salt marsh environments: Experimental evidence from electrical resistivity tomography in the Venice Lagoon, **Geophys**, 2014.
- BOSZCZOWSKI, R. R.; SILVA, J. M. Avaliação da Resistividade Elétrica de um Perfil de Solo Residual em Função do Intemperismo e Teor de Umidade. In: **COBRAMSEG 2008**. Buzios (RJ).
- BRAGA, A.C.O. Métodos Geométricos Aplicados na Caracterização Geológica e Geotécnica-Formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro SP. Rio Claro, Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista p.169, 1997.
- CAMARGO, I.P. Estudos sobre propagação da castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*). Lavras: UFLA, 1997.127p.
- CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; JORGE, L.A.C. Distribuição do sistema radicular dos citros em solo de tabuleiro costeiro. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDOS DE CASOS, 1999, Aracajú **Anais...Aracajú**, 1999. p.179-189

- CLEMENT, C.R. Brazil nut. Disponível em <<http://www.fao.org/docrep/v0784e/v0784e0k.htm>>. Acesso em 18 de janeiro de 2019.
- COGGON JH. 1973. A comparison of IP electrode arrays. **Geophysics**, 38(4): 737-761.
- DINIZ, T. D. de A. S.; BASTOS, T. X. Contribuição ao clima típico da castanha-do-brasil. Boletim Técnico do IPEAN, Belém, n. 64, p. 59-71, 1974.
- DUCKE A AND BLACK GA (1953) Phytogeographical notes on the Brazilian Amazonia. Anais da Academia Brasileira de Ciências 25(1): 1-46
- EISSENSTAT, D.M.; VAN REES, K.C.J. The growth and function of pine roots. **Ecological Bulletins**, v.43, p.76-91, 1994.
- ELIS, V. R. & ZUQUETTE, L. V. 2002. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Geociências**, 32: 119-134.
- ENTIN, J.K., ROBOCK, A., VINNIKOV, K.Y., HOLLINGER, S.E., LIU, S., NAMKHAI, A. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. **J. Geophys. Res.** 105 (D9), 11865-11877, 2000.
- FABIÃO, A. M. D.; MADEIRA, M.; STEEN, E. Root mass in plantations of *Eucalyptus globulus* in Portugal in relation to soil characteristics. **Arid Soil Research and Rehabilitation**, v. 1, p. 185-194, 1987.
- FREITAS, T.A.S.; BARROSO, D.G.; CARNEIRO, J.G. A dinâmica de raízes de espécies arbóreas: visão da literatura. **Ciência Florestal**, v.18, n.1, p.133-142, 2008.
- GALLAS, J. D. F. Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. 2000. 174p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- GALLAS, J. D. F. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. **Revista do Instituto Geológico**, 24(1/2), p.43-51, São Paulo. 2003.
- GANDOLFO, O.C.B.; MONDELLI, G.; BLANCO, R.G. (2012) The use of geophysical methods to investigate a contaminated site with organochlorine. In: International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'4), 4 2012, Porto de Galinhas, Brazil.
- GRACE, J.; MALHI, Y.; HIGUCHI, N. & MEIR, P. 2001. Productivity of tropical rain forests. In: ROY, J.; SAUGIER, B. & MOONEY, H.A. (Eds.) *Terrestrial global productivity*, San Diego: Academic Press. p.401-426.
- GRIFFITHS, D. H. & BARKER, R. D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. **Journal of Applied Geophysics**, v.29, p.211-226, 1993.
- GRIFFITHS, D. H. & KING, R. F. *Applied geophysics for geologists & engineers. The elements of geophysical prospecting*. 3ed. **Pergamon Press**, 1983. 230p.

- GONÇALVES, J. L. M.; MIRANDA, S. M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M; BENEDETTI, V. (Eds.). *Nutrição e fertilização de florestas*. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 221-267.
- HALLOF PG. 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements: Cambridge, MIT, Ph.D. thesis.
- HAMADA, J., GIACHETI, H.L., ELIS, V.R. & IWAI, C.K. Análise crítica dos sistemas de monitoramento de efluentes líquidos de aterros para resíduos sólidos. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 2002.
- HAYASHIDA-OLIVER, Y., R. G. A. BOOT & L. POORTER, 2001. Influência de la disponibilidad de água y luz en el crecimiento y la morfología de plantines de *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata* e *Bertholletia excelsa*. *Ecología en Bolivia* 35: 51-60
- JAYAWICKREME, D. H., R. L. VAN DAM, AND D. W. HYNDMAN. Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions, **Geophys. Res. Lett.**, 35, L18404, doi:10.1029/2008GL034690, 2008.
- KALINSKI, R.; KELLY, W. Estimating water content of soils from electrical resistivity. *GTJ. ASTM*, 16(3), 323-329. 1993.
- KELLER GV & FRISCHKNECHT FC. 1977. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford: Pergamon Press, 517 p.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento elétrico*. 3. ED. Rio Grande do Sul: **Sagra D.C Luzzatto**, 1995.
- LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Paulo: Rima Artes e Textos, 2000. 531 p.
- LEHMANN, J.; ZECH, W. Fine root turnover of irrigated hedgerow intercropping in Northern Kenya. **Plant and Soil**, v.198, p.19-31, 1998.
- LOCATELI, M.; VIEIRA, A. H.; GAMA, M. de M. B. *Cultivo da castanha-do-Brasil em Rondônia*. Rondônia: Embrapa, 2005. (Sistema de produção, 7).
- LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.; ALENCAR, J. C. *Essências madeireiras da Amazônia*. Manaus: CNPq, 1979.
- MATHIS, M. A.; TUCKER-KULESZA S. E.; SASSENATH.G. F. *Electrical Resistivity Tomography of Claypan Soils in Southeastern Kansas*, Issue 3 Southeast Agricultural Research Center, v.4, 2018.
- MAXIMO, O. A.; SAAD, A. M.; KUX, H. H. Estimativa do teor de água no solo utilizando dados de radar de abertura sintética. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 745-752, Sept. 1999. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06831999000300030&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06831999000300030&lng=en&nrm=iso)>. access on 08 Aug. 2020.
- MEDINA, C. C.; NEVES, C.S.V.J.; FONSECA, I.C.B.; TORRETI, A.F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.23, n.2, p.179-184, 2002.

- METCALFE, D.; MEIER, P.; WILLIAMS, M.A Comparison of methods for converting rhizotron root length measurements into estimates of root mass production per unit ground area. **Plant and Soil**, v. 301, p. 279–288, 2007.
- MOURA, P H. Métodos Geofísicos aplicados a Engenharia Elétrica, 2018.
- MULLER, C. H. Castanha-do-Brasil: resultados de pesquisa. Belém: EMBRAPA, 1980. (Miscelânea, 2).
- MULLER, C. H.; FIGUEIRÊDO, F. J. C.; KATO, A. K.; CARVALHO, J. E. U.; STEIN, R. L. B.; SILVA, A. B. A cultura da castanha-do-brasil. Brasília: Embrapa/SPI. p. 65, 1995. (Embrapa –SPI. Coleção plantar, 23).
- NEVES, E.S., WADT, L.H.O., GUEDES, M.C., 2016. Estrutura populacional e potencial para o manejo de *Bertholletia excelsa* (Bonpl.) em castanhais nativos do Acre e Amapá. **Sci. For.** 44 (109), 19–31.
- ORELLANA, E. Prospeccion geoelectrica en corriente continua. Madrid: Paraninfo, 1972. 523p.
- PACHECO, A.O. Ensaio com Cone Resistivo em Solos Saturados. Dissertação de Mestrado em Ciências, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 151 p. 2004.
- PIRES A. C. B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. **Rev. Bras. Geoc.** 25 (1): 61-68.
- REYNOLDS, J.M. 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons Ltd, 796p.
- REYNOLDS, J. M. Un introduction to applied and environmental geophysics. 2<sup>a</sup> ed. UK: Wiley-Blackwell, 2011.
- SALOMÃO, R. P., BRIENZA JÚNIOR, S., & ROSA, N. A. (2014). Reforestation dynamics in areas of restoration after mining in unit of forest conservation in the Amazon. **Revista Árvore**, 38(1), 1-24.
- SCHONGART, J., GRIBEL, R., FERREIRA DA FONSECA-JUNIOR, S., HAUGAASEN, T., 2015. Age and Growth Patterns of Brazil Nut Trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil. **Biotropica** 47, 550-558.
- SCHROTH, G. Root research methods for humid tropical agro-forestry systems - A management perspective. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDOS DE CASOS, 1999, Aracajú. **Anais...** Aracajú: 1999. p.255-268.
- SILVA, M.F.F.; ROSA, N.A. Estudos botânicos na área do projeto ferro Carajás, Serra Norte, Pará. In: Simpósio do Trópico úmido 1986.

SILVA, R. R.; NASCIMENTO, C. T. C. Visualização da propagação da umidade no solo por meio da eletrorresistividade. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.

SILVER, W. et al. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils. **Global Change Biology**. v. 11, p. 290-306. 2005.

SILVER, W.L.; NEFF, J.; VELDKAMP, E.; KEKKER, M.; COSME, R. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. *Ecosystems*, v.3, p.193-209, 2000.

SILVER, W.L.; THOMPSON, A.W.; McGRODDY, M. E.; VARNER, R.K.; DIAS, J.D.; SILVA, H.; CRILL, P. M. & KELLER, M. 2005. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils. **Global Change Biology**, 11(2):290-306

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Applied geophysics. 2nd ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990. 770p

THOMAS, E., C. A. Caicedo, J. Ioo, and R. Kindt. 2014. The distribution of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) through time: from range contraction in glacial refugia, over human-mediated expansion, to anthropogenic climate change. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* 9: 267-291.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M.F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40, n. 7, p. 633-638, jul. 2005.

WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Tulsa: **Society of Exploration Geophysicists (SEG)**, 1990. v.1: Review and Tutorial, p.147-189.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* s.t. blake no município de Santa Maria-RS. **Árvore, Viçosa**, v. 27, n. 2, p. 177-183, mar./abr. 2003.

WOOD, E. F. Advances in land surface modeling, U.S. Natl. Rep. Int. Union Geod. Geophys., 1987-1990, Rev. **Geophys.**, 29, 193-201, 1991.

YAMASAKI, M.T. Influência da salinidade do fluido na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Unesp/Bauru, São Paulo, 141 p, 2012

YAVITT, J.B. & WRIGHT, S.J. Drought and irrigation effects on fine root dynamics in a tropical moist forest, Panama. **Biotropica**, 33(3):421-434, 2001.

ZHOU, B & DAHLIN, T. Properties and effects of measurements errors on 2D resistivity imaging surveying. **Near Surface Geophysics**, v.1, p.105-117, 2003.

ZUIDEMA, P. A., W. DIJKMAN & J. VAN RIJSOORT, 1999. Crecimiento de plantines de *Bertholletia excelsa* H.B.K. en función de su tamaño y la disponibilidad de luz. *Ecología en Bolivia* 33: 23-36.

**CAPÍTULO 1- VARIAÇÃO SAZONAL DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLO SOB FLORESTA COM CASTANHEIRAS (*Bertholletia Excelsa* Bonp.), EM RESERVA EXTRATIVISTA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

## **Capítulo 1- Variação sazonal da resistividade elétrica de solo sob floresta com castanheiras (*Bertholletia excelsa* Bonp.), em reserva extrativista na Amazônia oriental**

### **RESUMO**

O estudo da resistividade elétrica do solo pode ser utilizado para entender como ocorre a variação de acúmulo de água em florestas e culturas. O conteúdo de umidade é um fator fundamental para a manutenção de ecossistemas, principalmente, durante a época de baixa precipitação, quando se torna crítica à manutenção de processos vitais, como a absorção de nutrientes. Com o objetivo de analisar a resistividade elétrica do solo e se a mesma é sensível às variações em períodos climáticos distintos (inverno e verão amazônico), foram realizados dois ensaios de eletrorresistividade em cada período. Foi utilizada a técnica do caminhamento elétrico, com o arranjo dipolo-dipolo, em uma área de floresta com presença de castanheiras-da-amazônia, situada na Resex Rio Cajari-AP. Os resultados mostraram que a variação da resistividade elétrica do solo modifica-se de acordo com o período sazonal, tendo uma diminuição da resistividade relacionada ao aumento da precipitação pluviométrica. A média geral de resistividade no inverno amazônico foi de 1269  $\Omega$ .m (L5Y0) e 1260  $\Omega$ .m(L6Y0) e no período mais seco do verão amazônico foi de 1742  $\Omega$ .m (L5Y0) e 2474  $\Omega$ .m (L6Y0). As camadas mais próximas da superfície do terreno, até uma profundidade de 0,25 m, são mais sensíveis às alterações climáticas. A capacidade de investigação horizontal da técnica não invasiva e do arranjo de eletrodos utilizados mostraram-se promissores para estudos da umidade das porções mais rasas do solo em floresta com castanheira-da-amazônia, relacionados à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem biogeoquímica de nutrientes. Entender a variação na resistividade e umidade do solo, principalmente durante o verão amazônico quando ocorre a floração e início da formação dos frutos das castanheiras, pode ajudar a explicar as diferenças na produção de amêndoas, facilitando o extrativismo da comunidade local, que depende das castanheiras para sua sobrevivência e reprodução social.

Palavras chave: caminhamento elétrico; castanheira-da-amazônia; umidade do solo, Resex Cajari.

## ABSTRACT

The study of electrical resistivity can be used to understand the variation of the soil water in forests and crops. The soil humidity content is a fundamental factor for the maintenance of ecosystems, especially during a low rainfall period. In this time, the humidity is critical to vital processes, such as the absorption of nutrients. In order to analyze the electrical resistivity of the soil and if it is sensitive to changes in weather cycles (amazonian winter and summer, two electroresistivity tests were performed in each cycle. The electrical profiling technique, with the dipole-dipole arrangement, was performed in a rainforest area with the presence of Brazil nut trees, located in the Resex Rio Cajari-AP. The results have shown that the variation of the electrical resistivity is a function of the seasonal period, with a reduction in resistivity with the increase in rainfall. The general average resistivity found in the Amazonian winter was 1269  $\Omega$ .m (L5Y0) and 1260  $\Omega$ .m(L6Y0) and in the driest period of the Amazonian summer it was 1742  $\Omega$ .m (L5Y0) and 2474  $\Omega$ .m (L6Y0). The layers closest to the top surface until a depth of 0.25 m are more sensitive to weather change. The horizontal investigation capacity of the non-invasive technique and the arrangement of the electrodes were promising for studies of the shallower portions of the soil in the forest with Brazil nut because it is related to the decomposition of organic matter and the biogeochemistry of nutrients. The understanding of the resistivity variation and soil humidity, mainly during the Amazonian summer when the Brazil nut starts to flower and to fruit, can help to explain the differences in the fruiting of almonds, easing the vegetal extractivism of the local communities which depend on Brazilnut trees for their survival.

Keywords: electric walk; Amazon-nut tree; soil moisture, Resex Cajari.

## 1. INTRODUÇÃO

A quantidade de água armazenada no solo cumpre um importante papel na interação solo-planta-atmosfera. O estudo e monitoramento desta variável é relevante para o entendimento de como a sazonalidade do ambiente pode alterar características do solo sob florestas, como a fertilidade e evapotranspiração. Assim, o conteúdo de umidade é um fator fundamental para a manutenção de ecossistemas, principalmente, durante a época de baixa precipitação, quando se torna crítica à manutenção de processos vitais, como a absorção de nutrientes. Além disso, é um fator indispensável para o entendimento de muitos processos hidrológicos que estão envolvidos em elevada variedade de processos naturais que atuam em diferentes escalas espacial e temporal (ENTIN et al., 2000; ALVALÁ et al., 2002).

No estudo da quantificação da umidade do solo, a estimativa desse parâmetro a partir de modelos matemáticos depende de funções de representações, sujeitas a erro de parametrização. Além disso, a estimativa em escala regional, usando medidas de campo pontuais, encarece os custos, sendo necessários tempo e esforço elevados (WOOD, 1991; LAKSHMI; WOOD; CHOUDHURY, 1997). Assim, torna-se necessário pesquisar método indiretos não invasivos, que possam realizar essa medição de maneira mais econômica e com possibilidade de aplicação em larga escala.

Nesse sentido, a medição de umidade do solo por observações de satélites com sensores na faixa de micro-ondas é útil para estimativa regional (MÁXIMO; SAAD; KUX, 1999). Outros estudos têm apontado que o teor de umidade do solo pode ser inferido a partir de dados de resistividade elétrica do solo por meio medidas obtidas pelo método eletrorresistividade (JAYAWICKREME; VAN DAM; HYNDMAN, 2008). Esses autores quantificaram as diferenças na captação de umidade da zona radicular em floresta e na zona vadosa de solo de clima frio, concluindo que é possível obter informações significativas sobre as interações entre a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera.

O método de eletrorresistividade, cujo parâmetro físico inerente é a resistividade elétrica, que é o inverso da condutividade elétrica, é um método de geofísica rasa, não invasivo. Ele pode ser aplicado com a técnica de caminhamento elétrico, utilizando arranjos de eletrodos, como o dipolo-dipolo e Wenner, na pré-avaliação das propriedades físicas e químicas de solos sob florestas ou cultivados. É muito útil na agricultura de precisão, para mapear características de pequena e/ou grande escala dentro do perfil do solo (REYNOLDS, 2011).

A delimitação espacial na área investigada, de locais com presença de anomalias de resistividade elétrica em subsuperfície, permite inferir sobre posições para procedimentos de coletas de amostras, principalmente, de propriedades físicas como a umidade e compactação.

Essas informações são importantes para tomadas de decisões no manejo da área, quanto a intervenção sobre nutrientes, defensivos agrícolas e irrigação. Assim, a geofísica permite a identificação e caracterização de parâmetros físicos do solo de maneira indireta em diferentes espaços e tempos.

São vários os fatores que podem influenciar a resistividade do solo: a classe de solo, a mistura de diversos tipos de solo, os solos constituídos por camadas estratificadas com espessuras e materiais diferentes, o teor de umidade, a temperatura, a compactação e pressão, a composição química dos sais dissolvidos na água retida (KINDERMANN et al., 1995; REYNOLDS, 2011). Além disso, a resistividade do solo acompanha os períodos de estiagem e chuva de uma região.

Silva e Nascimento (2013) por meio de modelagem e inversão de dados de resistividade elétrica, obtidos pela técnica de CE com arranjo Wenner, demonstraram como é possível visualizar o progresso de uma pluma de água em Latossolo e comprovar um aumento progressivo da umidade do solo relacionada à área de baixa resistividade. Esses resultados evidenciaram a aplicabilidade do método de eletrorresistividade para visualização do avanço da umidade do solo em um período de quatro horas.

A utilização do método eletrorresistividade em uma área de conservação ambiental em Brasília, mostrou que a variação de resistividade é maior em solos arenosos do que em solos predominantemente argilosos (NASCIMENTO, PIRES, 1995). Esse estudo evidenciou também que solos ricos em argila são mais condutivos que solos arenosos, independentemente da condição de umidade. Já foi também verificado, que as medidas de eletrorresistividade podem ser usadas para inferir o teor de umidade do solo, quando uma simples relação de potência é usada (WALKER E HOUSER, 2002). Esses autores realizaram determinações rápidas do conteúdo de umidade em zona radicular, relacionando os valores com a resistividade elétrica aparente, obtida através do CE na configuração dipolo-dipolo. Os autores encontraram um coeficiente de correlação de 0,80.

Dentro deste contexto, o objetivo desse trabalho é analisar a resistividade elétrica do solo e se a mesma é sensível às variações em períodos climáticos distintos utilizando a técnica do caminhamento elétrico com o arranjo de eletrodos dipolo-dipolo. Foi avaliada uma área de floresta ombrófila com presença de castanheiras-da-amazônia, situada na Reserva Extrativista do Rio Cajari, uma Unidade de Conservação federal de uso sustentável na Amazônia oriental.

## **2.MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de Estudo e Delineamento Amostral**

A pesquisa foi realizada na região centro-norte e nordeste da Unidade de Conservação (UC) Reserva Extrativista do Rio Cajari/AP - Resex Cajari (Figura 1).

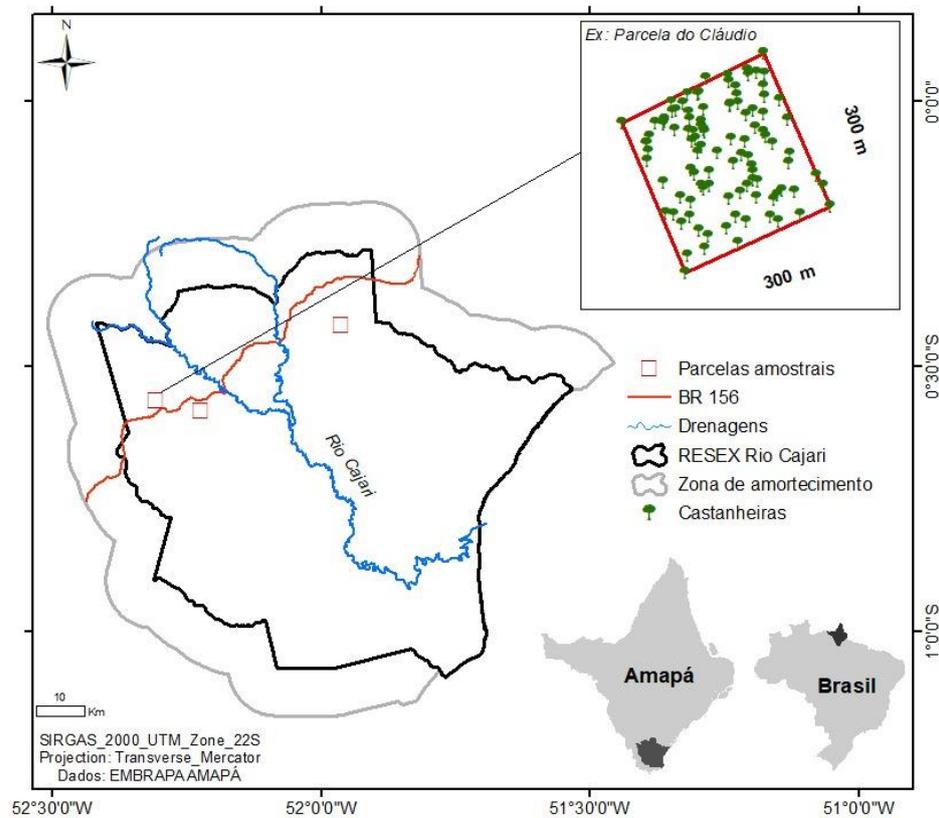


Figura 1-Localização da área de estudo – Estado do Amapá e Resex do Rio Cajari, com as parcelas permanentes onde ocorrem as castanheiras.

A Resex Cajari abrange os municípios de Mazagão (44,45% da UC), Laranjal do Jari (38,67% da UC) e Vitória do Jari (16,88% da UC). Suas principais bacias hidrográficas são a do Rio Cajari, Rio Ajuruxi, Rio São Luís, Rio Muriacá, Igarapé Ariranha e Igarapé Tambaqui, todas fazendo parte da Bacia do Rio Amazonas (SOBRINHO, 2017).

Com uma área que se aproxima de 502.000 ha, a Reserva Extrativista do Rio Cajari é uma Unidade de Conservação federal, de uso sustentável sob vigilância do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), órgão vinculado ao Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA) Em se tratando de acesso para adentrar na reserva, esse pode ocorrer através de via terrestre ou fluvial. Por via terrestre o acesso é feito pela BR-156 (trecho sul) que liga Macapá-AP a Laranjal do Jari-AP, através das entradas ao norte ou a oeste da reserva. Pelo rio, o acesso acontece pelo Canal Norte (foz do Rio Amazonas)

Os recursos naturais da UC são utilizados de maneira sustentável pela população extrativista do local, conservando a biodiversidade e junto a isso protegendo os meios de vida e a cultura dos residentes. Entre suas características encontram-se paisagens cobertas por savanas e matas

fechadas de vegetação ombrófila, havendo várias espécies de plantas, entre elas a castanheira-da-amazônia (SOBRINHO, 2017).

O clima da Resex Cajari, está na transição entre o clima tropical da savana (Aw) e o clima tropical clima de monção (Am), predominando o Am na maior parte (ALVARES et al., 2013). A região apresenta temperatura média anual de 25°C, com média das mínimas de 18°C e das máximas de 31,5°C. A precipitação anual é de, aproximadamente, 2300 mm, com uma longa estação chuvosa de dezembro a junho (inverno amazônico). Na figura 2, utilizando dados de 30 anos (1961 a 1990) da última normal climatológica publicada, é possível perceber que os meses de maior precipitação da área ocorrem em março, abril e maio e os de menor precipitação (verão amazônico) em setembro, outubro e novembro.

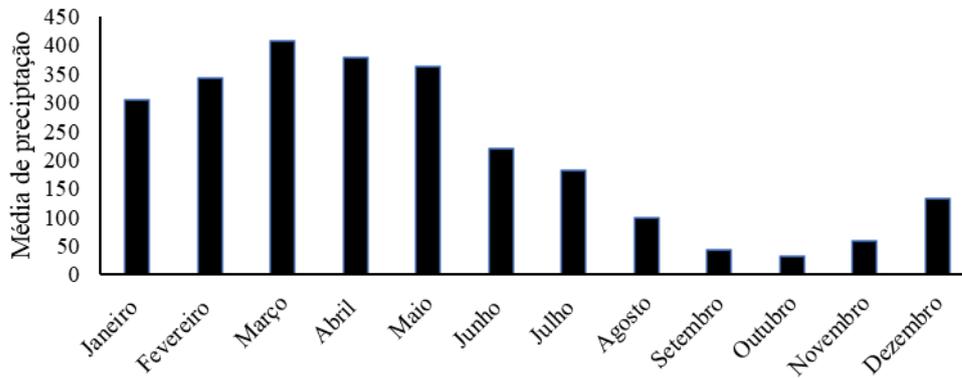


Figura 2- Precipitação Acumulada Mensal (mm) – média do período 1961-1990. Dados coletados na estação meteorológica de Macapá, capital do Amapá. Fonte: Sobrinho (2017).

Em se tratando da geologia do local, a mesma apresenta um substrato geológico variado, com afloramentos provenientes das Formações Jatapu, Maecuru, Ererê, Barreirinha, Alter do Chão, além de Aluviões do Quaternário (ISSLER et al., 1974; SOBRINHO, 2017).

De acordo com o sistema brasileiro de classificação do solo, a antiga floresta de terra firme da Resex Cajari apresenta principalmente Latossolos (SANTOS et al., 2015). A área de estudo na Resex Cajari fica a, aproximadamente, 150 m acima do nível do mar.

Não foi encontrado nenhum outro estudo realizado na região para verificar o comportamento da resistividade do local. No entanto, estudos pedológicos realizados na área das parcelas permanentes demonstraram a existência de Argissolo Vermelho Amarelo, Argissolo Acizentado e Latossolo (GUEDES et al., 2017). O Argissolo possui uma maior capacidade de retenção de água e de nutrientes, favorecendo a ciclagem biogeoquímica e a manutenção da

capacidade produtiva das castanheiras, aumentando, assim, a umidade nesses solos, principalmente no inverno amazônico (GUEDES et al., 2017).

Sobre os solos da área, existe elevada variedade de espécies vegetais e fitofisionomias, destacando-se vegetações da floresta ombrófila densa submontana e a floresta ombrófila aberta, além de savanas do tipo campo cerrado, e presença de muitas castanheiras (SOBRINHO, 2017). As castanheiras ocorrem agregadas em manchas de florestas denominadas castanhais, espalhadas por uma matriz florestal, em cuja maior parte não há castanheiras (COSTA et al., 2017).

Na parcela permanente (300 m x 300 m), escolhida como unidade amostral, foram realizadas duas linhas de Caminhamento elétrico (CE). Ambas foram medidas tanto no período chuvoso (maio) e quanto no período de estiagem (novembro). As medidas de resistividade elétrica do solo foram sempre nas mesmas coordenadas para verificar se há diferença de resistividade entre os dois períodos.

A parcela é organizada em linhas paralelas devidamente classificadas. Dentro da área amostral as linhas vão de L1Y0-L1Y300 até a L6Y0-L6Y300. As coletas foram realizadas nas linhas L5Y0 e L6Y0.

## **2.2 Coleta e análises de dados da resistividade elétrica**

As medidas de resistividade aparente ( $\rho_a$ ) foram realizadas em duas linhas com solos diferenciados, denominadas L5Y0 (solo mais argiloso 165 g/kg) tendo um teor de areia de 615 g/kg e L6Y0 (menos argiloso 146g/kg) com um teor de areia de 695 g/kg. As avaliações foram realizadas nas duas linhas, em ambos os períodos: entre os dias 2 a 5 de novembro de 2018 (período de estiagem do verão amazônico) e entre os dias 4 a 6 de maio de 2019 (período mais chuvoso do inverno amazônico). Utilizei a técnica de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo (Figura 4),

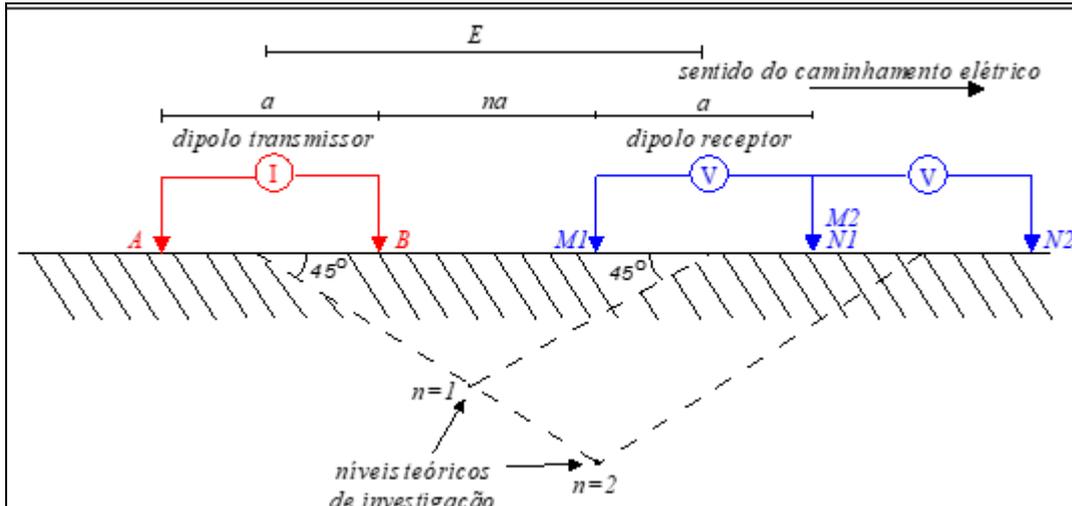


Figura 3- Disposição dos eletrodos em campo, seguindo o arranjo tipo dipolo-dipolo.

O arranjo dipolo-dipolo foi utilizado por apresentar boa resolução lateral e baixo acoplamento eletromagnético entre os circuitos de corrente e de potencial (LOKE, 1998). O arranjo dipolo-dipolo é muito sensível às mudanças horizontais na resistividade. Foram usados espaçamentos constantes entre os eletrodos, iguais a 0,5 m, com cinco níveis de amostragem ( $n$  mudado 5 vezes), para obter adequada profundidade de investigação e resolução lateral, ao longo de 5 linhas de 17 eletrodos, alinhados na superfície do solo. Uma trena colocada sobre o terreno foi usada para controlar o intervalo entre os eletrodos. O equipamento utilizado foi o resistivímetro SARIS, fabricado pela empresa canadense Scintrex (Figura 4). O tempo de injeção e relaxamento de corrente utilizado foi de 2 s. Na figura 5, observam-se os instantes durante os trabalhos de campo.



Figura 4– Resistivímetro SARIS, utilizado nos trabalhos de campo.



Figura 5 – Momentos durante o trabalho de campo na floresta com castanheiras da Resex Cajari, sul do Estado do Amapá, Amazônia oriental.

As medidas obtidas de resistividade aparente foram processadas através do programa computacional RES2DINV, que adota uma técnica rápida e eficiente para inversão de dados de resistividade (LOKE, 1998), baseada no método dos mínimos quadrados com suavização restringida. Os processos de inversão de dados de resistividade buscam estabelecer um modelo da provável distribuição real dos valores de resistividade elétrica aparente em subsuperfície, partindo de um modelo de estimativa inicial, construído diretamente a partir das medidas de campo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de verificar se a resistividade elétrica aparente do solo é influenciada pela precipitação pluviométrica foram ensaiadas as linhas L5Y0 e L6Y0 nos dois períodos climáticos amazônicos (estiagem e chuvoso).

A figura 6 mostra os perfis de resistividade elétrica aparente dos cinco níveis investigados pelo CE da linha L5Y0. Observando a figura, com exceção dos níveis 3, 4 e 5, os níveis 1 e 2, respectivamente, profundidades aparentes de 21 cm e 35 cm, os valores de resistividade elétrica do período de chuvas (maio) são relativamente menores do que os valores do período de estiagem (novembro). Para os demais níveis 3 a 5, somente 3 ou 4 medidas iniciais dos

perfis foram resistivas no período de chuvas, quando comparadas com os dos perfis do período de estiagem, as demais medidas tiveram o comportamento de baixa resistividade, análogo as medidas dos dois primeiros níveis investigados.

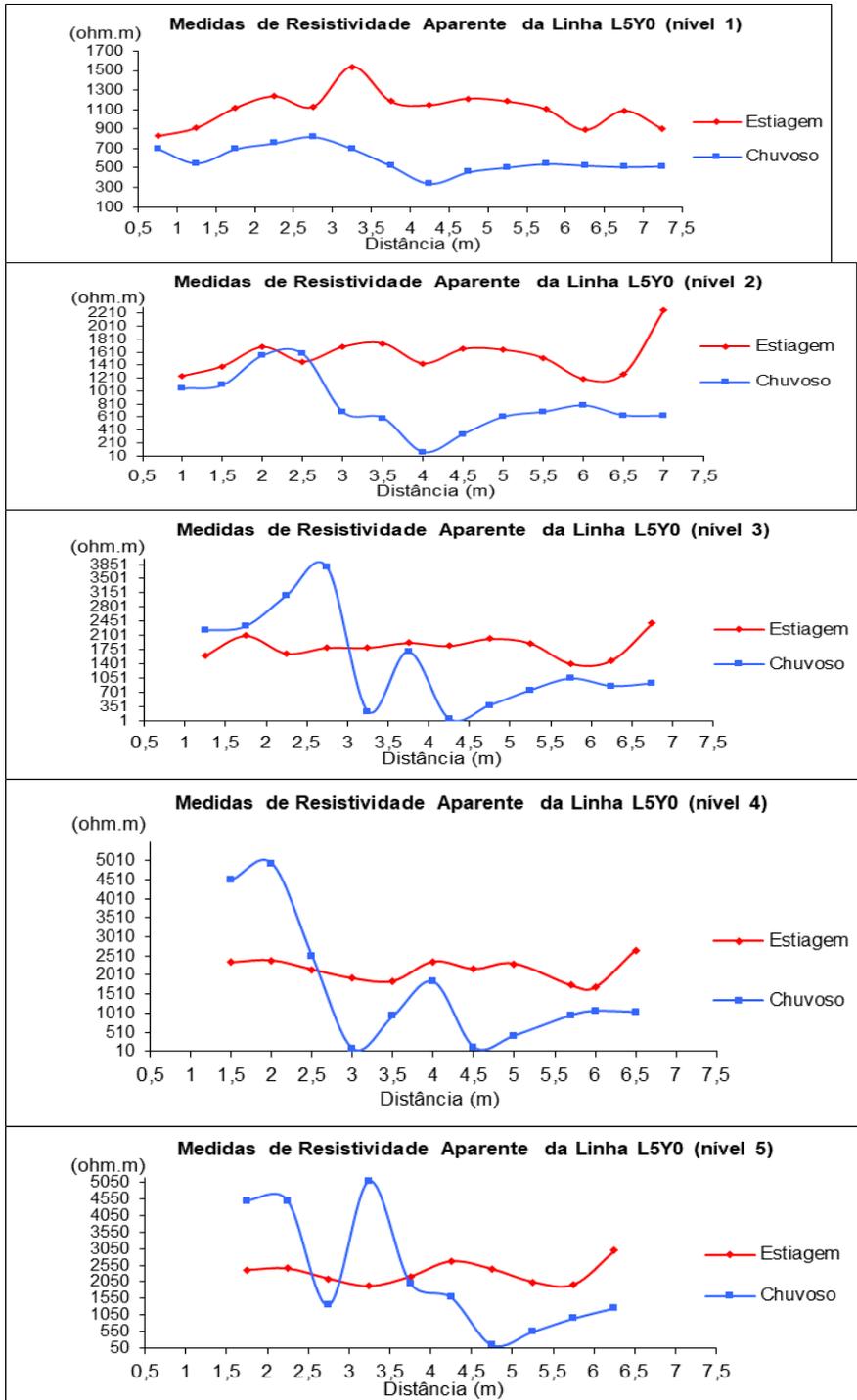


Figura 6- Perfis de resistividade elétrica aparente em níveis crescentes de profundidade na linha L5Y0, obtidos nos períodos de estiagem (11/2018) e chuvoso (05/2019), em floresta com castanheiras na Resex Cajari-AP, Amazônia oriental.

Na Tabela 1, têm-se as estatísticas descritivas dos dados de resistividade elétrica aparente, nas duas coletas sazonais. Pode-se observar que, em geral, as resistividades no período chuvoso são menores do que as resistividades no período de estiagem. Comprova-se também a maior variação observada no período chuvoso, pelo maior valor do desvio padrão e maior amplitude (máximo – mínimo = 5041) nesse período.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas da resistividade elétrica aparente da linha L5Y0 nos períodos sazonais, estiagem (11/2018) e chuvoso (05/2019), em floresta com castanheiras na Resex Cajari-AP, Amazônia oriental.

<b>Estatísticas</b>	<b>Estiagem</b>	<b>Chuvoso</b>
<b>Núm. medidas</b>	60	60
<b>Mínimo</b>	829	42
<b>Máximo</b>	3005	5083
<b>Mediana</b>	1718	772
<b>Média</b>	1742	1269
<b>Desvio p.</b>	515	1272

No período chuvoso, as medidas de tendência central média e mediana, respectivamente, 1269  $\Omega$ .m e 772  $\Omega$ .m, são menores do que as do período de estiagem.

Na figura 7b, confirma-se a maior frequência de dados de resistividades baixas na época chuvosa, correspondendo a 73,3 % (44 em 60) das medidas abaixo de 1482  $\Omega$ .m, quando comparados aos dados da época de estiagem, cujas medidas abaixo de 1482  $\Omega$ .m correspondem apenas a 33,3% (20 medições em 60).

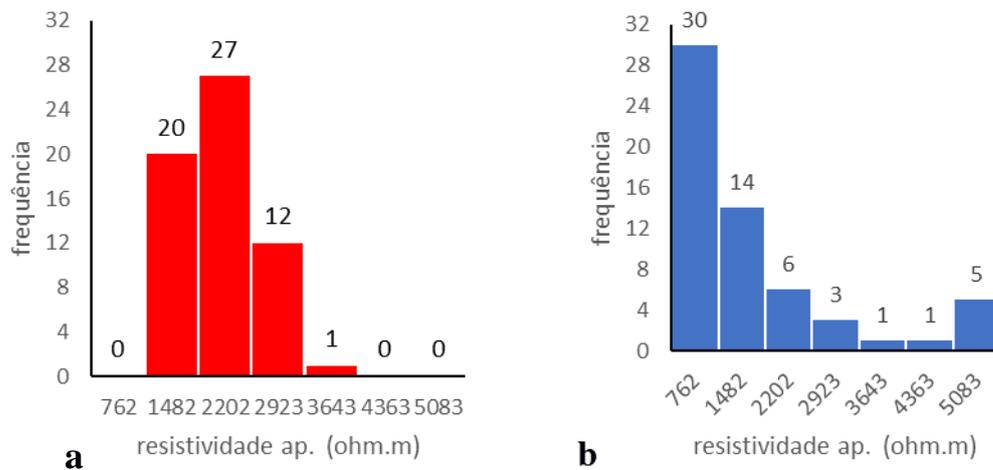


Figura 7 – Histogramas dos dados de resistividades da linha L5Y0, coletados nos períodos sazonais. (a) estiagem e (b) chuvoso em floresta com castanheiras na Resex Cajari-AP, Amazônia oriental.

Na figura 8, referente à linha L6Y0, nota-se que os valores de resistividade aparentem nos níveis 1 (até 21 cm), 2 (35 cm) e 4 (61 cm) demonstraram-se mais resistivos no período de estiagem. No entanto os níveis 3 e 5 apresentaram medidas de resistividade mais elevadas no período de chuva na distância 2,3 e 1,6 m respectivamente ao longo da linha de caminamento. Verifica-se nessa linha um solo menos argiloso, aferidos pelas análises texturais de amostras de solo. Assim percebe-se um padrão mais consistente de diferença na resistividade em função das estações climáticas, com maior resistividade no período de estiagem e valores bem mais elevados do que na linha L5Y0.

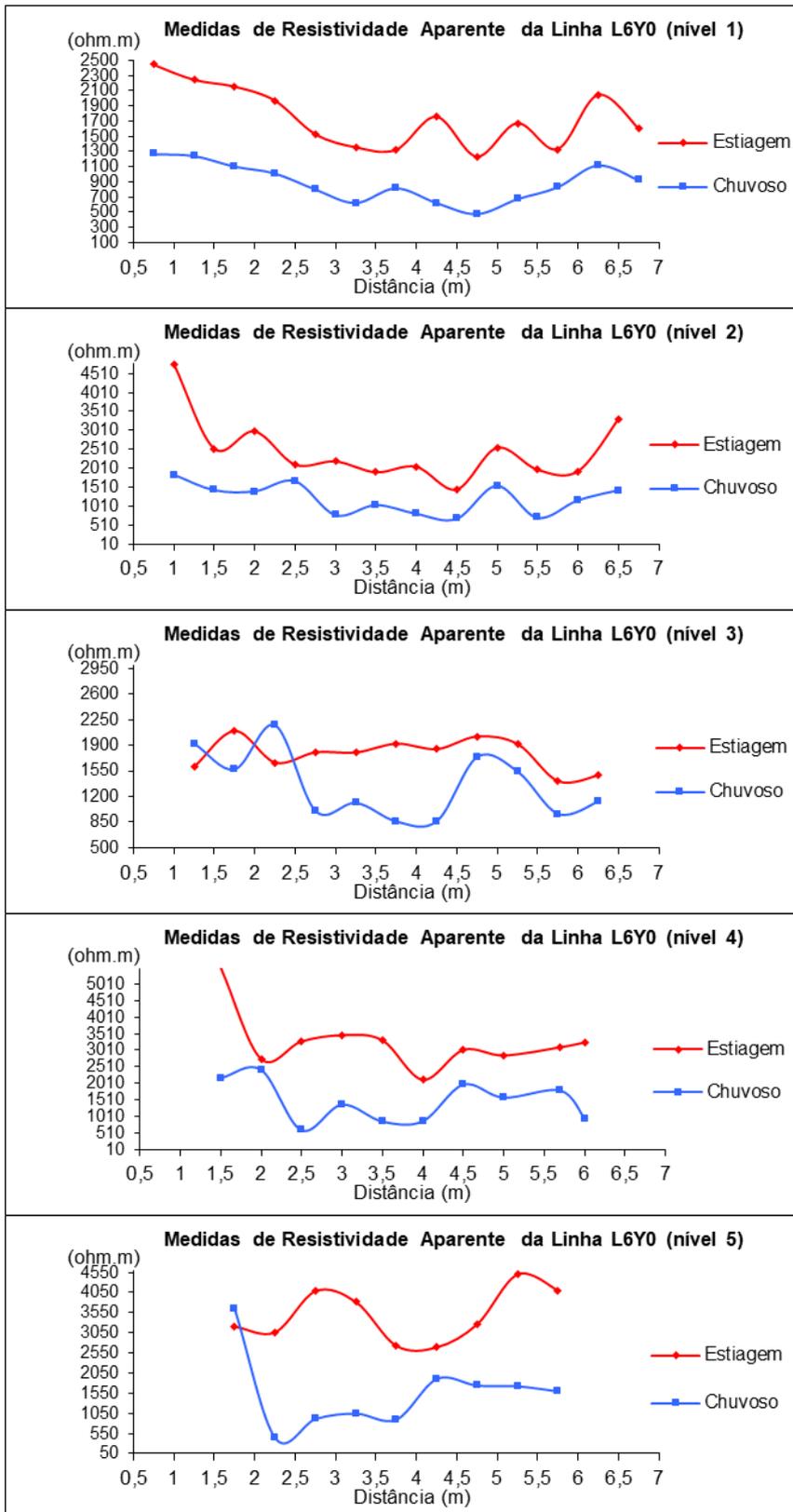


Figura 8- Perfis de resistividade aparente dos níveis da linha L6Y0, obtidos nos ensaios em dois períodos distintos (estiagem e chuvoso).

Observa-se, de forma geral, um comportamento único de variação dos valores de resistividades em todos os perfis investigados em função do período climático. Os resultados mostram que no período chuvoso as resistividades são menores do que as resistividades medidas no período de estiagem, isso é explicado pelo aumento da quantidade de água pluvial infiltrada na área do local do ensaio indicando que é um fator desejável, pois a água de precipitação é infiltrada e armazenada no solo não induzindo ou intensificando erosão na superfície do terreno.

A Tabela 2 descreve estatisticamente os dados de resistividade elétrica aparente, e a figura 10 descreve os histogramas dos dados. Pode-se observar que as resistividades no período chuvoso são menores do que as resistividades no período de estiagem. No período chuvoso as medidas de tendência central média e mediana, respectivamente, de valores 1260  $\Omega.m$  e 1111  $\Omega.m$  são menores do que as do período de estiagem, quando 47,3% das medidas do período chuvoso estão abaixo de 1083  $\Omega.m$  (figura 10b). Na figura 10b, observa-se a maior frequência de dados de resistividades baixas na época chuvosa, correspondendo a 78,2 % das medidas abaixo de 1720  $\Omega.m$ , quando comparados aos dados da época de estiagem (figura 10a), cujas medidas abaixo de 1720  $\Omega.m$  são de 21,8%.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas da resistividade elétrica aparente da linha L6Y0 nos períodos sazonais.

<b>Estatísticas</b>	<b>Estiagem</b>	<b>Chuvoso</b>
<b>Núm. medidas</b>	55	55
<b>Mínimo</b>	1226	445
<b>Máximo</b>	5546	3637
<b>Mediana</b>	2110	1111
<b>Média</b>	2474	1260
<b>Desvio p.</b>	956	578

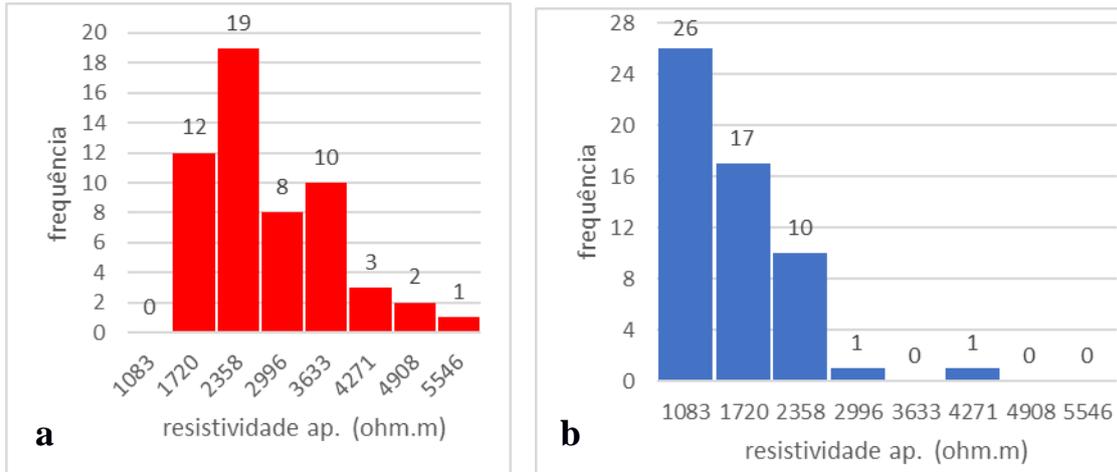


Figura 10 – Histogramas dos dados de resistividades da linha L6Y0, coletados nos períodos sazonais. (a) estiagem e (b) chuvoso.

Estes resultados estão de acordo com os trabalhos Silva et al., 2013, que verificaram se as mudanças nos padrões de resistividade ao longo de um período sazonal podem ser relacionadas com as mudanças de estações climáticas. Nesses trabalhos foi verificado que houve um aumento da resistividade com diminuição da precipitação pluviométrica na estiagem, sendo que os valores são reduzidos à medida que a precipitação aumenta. Além disso, verificou-se também, o quanto a primeira camada do solo é mais sensível às mudanças climáticas, quando comparada com a sensibilidade das demais camadas, o que corrobora os resultados deste trabalho.

Na figura 11, são mostradas as pseudoseções de resistividade elétrica da subsuperfície investigada obtidas pelas inversões dos dados de campo da linha L5Y0 durante os períodos de estiagem e de chuva. O modelo relativo ao período de estiagem (Figura 11a) apresenta nas profundidades iniciais (até 0,25 m) resistividades moderadas, variando de 600 a 1300  $\Omega$ .m. De forma geral, os resultados obtidos pela distribuição de resistividades do meio investigado demonstraram baixos valores de resistividade elétrica no solo superficial em relação às resistividades presentes nas maiores profundidades (> 1300  $\Omega$ .m).

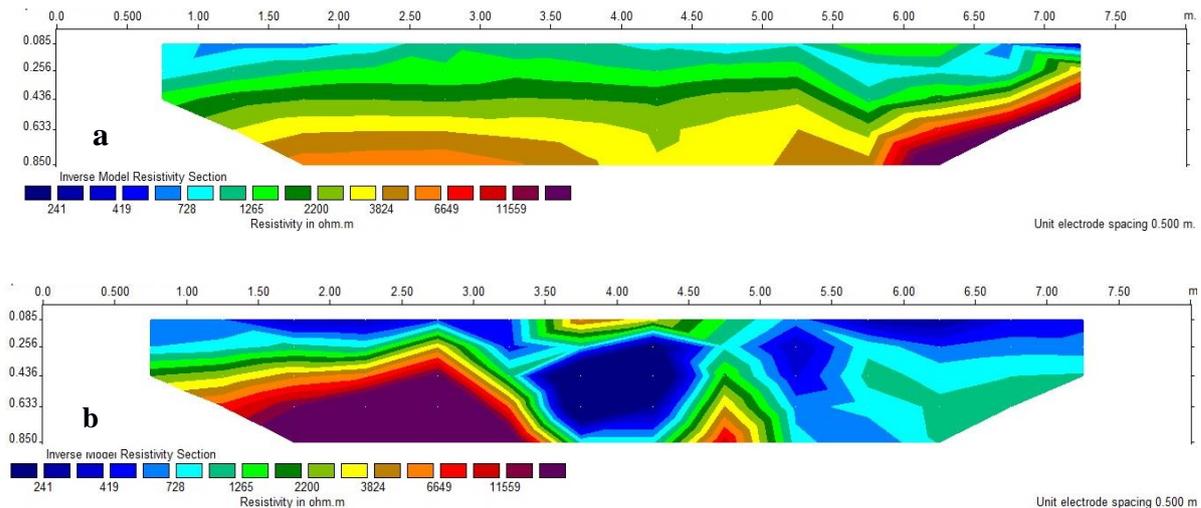


Figura 11- Modelos interpretados dos ensaios da linha L5Y0, (a) período de estiagem e (b) período de inverno amazônico, em floresta com castanheiras na Resex Cajari-AP, Amazônia oriental.

A baixa resistividade elétrica do solo superficial pode estar correlacionada com a presença de matéria orgânica proveniente da decomposição de folhas, galhos e troncos, o que impede a penetração da luz solar, mantendo o solo úmido mesmo em período de poucas chuvas. É possível perceber de forma geral que as resistividades elétricas da sub superfície investigada no período de inverno amazônico sofreram alterações, tornando-as menos resistivas (Figura 11b). Percebe-se que no período de inverno houve uma mudança significativa nos primeiros 0,3 m de profundidade, quando a variação de resistividade ficou em torno da média de 300  $\Omega$ .m, muito menos resistiva e mais condutiva do que o encontrado no período de estiagem, o que significa influência da precipitação pluviométrica nas resistividades do meio investigado. Isso é confirmado, também em profundidade, para a maior parte do perfil, na parte final da linha de caminhamento e, principalmente, em sua região central. Nessa região, verifica-se uma mancha de valores muito baixos de resistividade até nas maiores profundidades avaliadas, que podem ser associados com raízes de grandes árvores que favorecem a infiltração e percolação de água no perfil do solo (WITSCHORECK et al., 2003).

Vale ressaltar que o modelo de distribuição de resistividade elétrica no período chuvoso (Figura 11b), apresentou uma zona resistiva entre as posições de medidas 1 m e 3,5 m na profundidade abaixo de 0,4 m exibindo no centro da extremidade final do modelo, entre as profundidades entre 0,4 m a 0,8 m, existem baixos valores de resistividades atingindo predominantemente um mínimo de 241  $\Omega$ .m e um máximo de 1265  $\Omega$ .m. Essa variação de resistividades baixas é ocasionada pelo conjunto da disposição do sistema radicular da vegetação, predominantemente de castanheiras, e/ou a complexidade das disposições volumétricas de proporções de sedimentos (argila, silte e areia) saturados. Witschoreck et al.

(2003) ressaltam que grandes quantidades de raízes, principalmente de árvores de grande porte como no caso de castanheiras, buscam áreas com alto índice de saturação, já que nesses espaços ocorre maior concentração de nutrientes, e isso pode ocasionar fissuras, durante seus crescimentos facilitando o acúmulo de água em determinadas regiões do solo.

A zona resistiva presente em subsuperfície (abaixo da profundidade de 40 cm) no início da linha de caminhamento do modelo de distribuição de resistividade (11b), na lateral esquerda da zona profunda de baixa resistividade associada às fissuras causadas por grandes raízes, pode também estar relacionada com isso. Com a facilitação da percolação da água no solo pelas fissuras, cria-se um gradiente de drenagem também da água livre localizada lateralmente à fissura. Tanto que, do lado direito também se observa o mesmo comportamento, apesar de ocorrer em menor intensidade. Também pode ser possível que a zona resistiva esteja abaixo de alguma camada compactada, que dificulte a percolação da água, todavia seria necessário realizar escavações no local de estudo para avaliar o que está causando esse aumento de resistividade.

Na figura 12 têm-se os modelos interpretados da distribuição de resistividade elétrica do meio investigado pela linha L6Y0 nos dois períodos climatológicos distintos. O modelo (Figura 12a) encontrado para o período de estiagem mostrou variação de resistividade bem elevada (predominantemente acima de 900  $\Omega.m$ ) quando comparada com a encontrada no período chuvoso (Figura 12b), tendo as resistividades aumentando predominantemente com a profundidade.

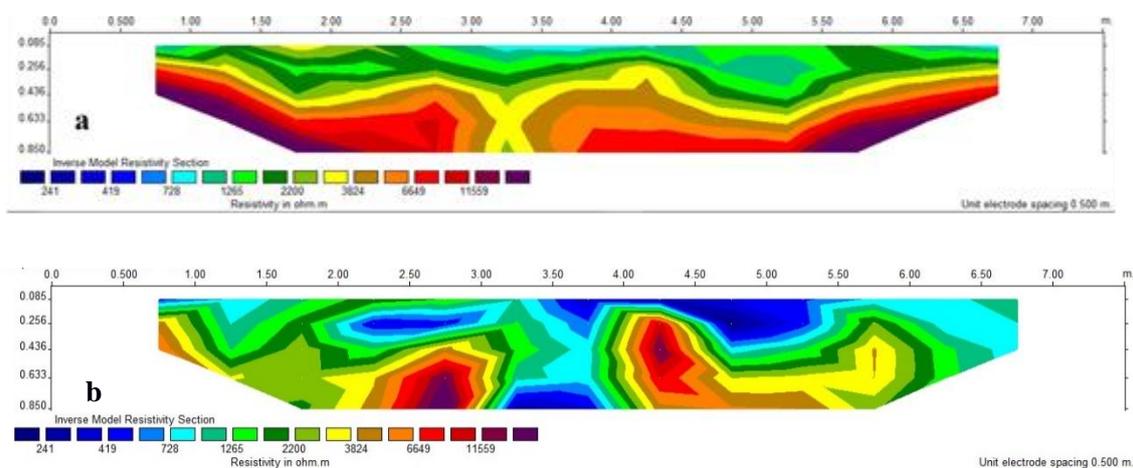


Figura 12- Modelos interpretados dos ensaios da linha L6Y0, (a) período de estiagem e (b) período de inverno amazônico, em floresta com castanheiras na Resex Cajari-AP, Amazônia oriental.

No modelo da figura 11b, período chuvoso, observam-se os predomínios de resistividades baixas ( $< 900 \Omega.m$ ) no centro do modelo, da superfície a 0,85 m de profundidade, e na extensão total do modelo, acima da profundidade de 0,44 m. Esse padrão de baixos valores de resistividade encontrada no modelo do período chuvoso, deve-se as precipitações pluviométricas ocorridas no período.

De maneira geral, os modelos dos perfis da linha L6Y0 (menos argiloso) são mais resistivos do que aqueles da linha L5Y0 (mais argiloso). Isso é coerente com a teoria apresentada que relaciona a resistividade com a textura do solo, pois no solo menos argiloso e mais arenoso, há menor acúmulo de água, o que diminui a condutividade e aumenta a resistividade. Estudos demonstram que a precipitação pluviométrica interage com as características físicas do solo, alterando o comportamento da resistividade de um determinado ambiente. Visacro (2002) encontrou que em solo mais argiloso a resistividade elétrica variou entre  $80 \Omega.m$  e  $300 \Omega.m$ , e em solo mais arenoso, a resistividade variou de  $3000 \Omega.m$  a  $8000 \Omega.m$ . Além da questão física, essa mudança de resistividade também é devida a maior facilidade da condução de íons cátions ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $H^+$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Al^{3+}$ ) e ânions ( $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ) presentes na solução de solos mais argilosos. Uma porcentagem maior de água faz com que os minerais existentes no solo liberem íons, produtos do intemperismo químico, formando um meio eletrolítico, favorável a passagem de corrente iônica, o que diminui a resistividade.

Além das questões inerentes às diferenças no próprio solo, é importante considerar também as interações com a vegetação, para discutir a variação de resistividade elétrica na área investigada, que é uma floresta densa da Amazônia oriental. Quando comparados os modelos interpretados da distribuição de resistividade da subsuperfície nos períodos climáticos diferentes, relacionando isso à umidade do solo, não se pode esquecer que essa umidade também depende da vegetação sobre ele. Witschoreck et al. (2003) ressaltam que a camada de serapilheira em áreas de florestas, corrobora para que ocorra uma espécie de isolamento térmico, evitando o superaquecimento do solo e a perda de água por evaporação, contribuindo para a preservação da umidade do solo.

Outro fator importante que pode estar relacionado a essa variação de resistividade do solo na área de estudo é a presença abundante da cobertura de castanheiras. Kainer et al. (2007) constataram que o elevado índice de chuvas provoca o desenvolvimento e acúmulo de raízes finas na sub superfície, induzindo assim, um aumento de porosidade e o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) no solo, que são benéficas para a castanheira-da-amazônia, já que tal fator aumenta a produção de amêndoas pela espécie. Além disso, os

fungos micorrízicos produzem extensa rede de micélios e essa pode constituir mais de 25% do total da biomassa microbiana do solo (OLSSON et al., 1999), possibilitando assim o acúmulo de biomassa nesses locais mais superficiais, e a baixa resistividade na área (BERNATCHEZ et al., 2008).

#### **4. CONCLUSÃO**

Os resultados obtidos mostram que a resistividade elétrica do solo varia de acordo com o período de estiagem e de chuva na região da Amazônia oriental avaliada. Foi possível observar o aumento da resistividade no período de estiagem e a diminuição desse parâmetro, relacionado ao aumento da precipitação pluviométrica na área. Além disso, pôde-se verificar que as camadas de solos mais próximas da superfície do terreno foram as mais sensíveis às mudanças climáticas.

A capacidade de investigação horizontal da técnica não invasiva e do arranjo de eletrodos utilizados mostraram-se promissoras para estudos das porções mais rasas do solo sob floresta com a presença de castanheiras-da-amazônia, relacionados à decomposição da matéria orgânica e a ciclagem biogeoquímica de nutrientes. Entender a variação na resistividade e umidade do solo, principalmente durante o verão amazônico quando ocorre a floração e início da formação dos frutos das castanheiras, pode ajudar a explicar as diferenças na produção de amêndoas facilitando o extrativismo da comunidade local.

Agradecimentos:

À Embrapa, pelo financiamento do projeto EcoGenCast (12.13.05.017.00.04), que propiciou a logística para o estudo. À CAPES, pela bolsa de mestrado ao primeiro autor desse trabalho. À UNIFAP e ao PPG em Ciências Ambientais, pelo equipamento utilizado e pelas condições acadêmicas para desenvolvimento da dissertação ao qual esse trabalho está vinculado.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G. Köppen climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* 22, 711–728. Baddeley, A., Turner, R., Spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. **J. Stat. Softw.** 12 (6), 1–42, 2005.
- ALVALÁ, R. C. S., GIELOW, R., ROCHA, H.R., FREITAS, H.C., LOPES, J.M., MANZI, A.O., RANDOW, C.VON., DIAS, M.A.F.S., CABRAL, O.M.R Intra diurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content and thermal properties under forest and pasture in Rondônia, **J. Geophys. Res.**, 107, 10.1029/ 2000JD000337, in press, 2002.
- BERNATCHEZ, F., JEANNOTTE, R., BEGG, CAROLINE & HAMEL, CHANTAL, WHALEN, JOANN. Soil fertility and arbuscular mycorrhizal fungi related to trees growing on smallholder farms in Senegal, **Journal of arid environments** 72(7):1247-1256, 2008.
- COSTA, M. C., HELIO, T., MENDES, P.F. Atributos do solo relacionados com a produção de castanheira. *Floresta e Ambiente*, v. 24, e20150042, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.004215.EMBRAPA.
- MANUAL DE LABORATÓRIO: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Paulo: **Embrapa Pecuária Sudeste**, 2005. 313 p.
- ENTIN, J.K., ROBOCK, A., VINNIKOV, K.Y., HOLLINGER, S.E., LIU, S., NAMKHAI, A. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. **J. Geophys. Res.** 105 (D9), 11865–11877, 2000.
- FERREIRA, F.J.F. Técnicas e aplicações de imageamentos elétricos 2-D E 3-D. **Curso de Pós-Graduação em Geologia Disciplina Geofísica Exploratória** 2002.
- GODIO, A., NALDI, M. two-dimensional electric imaging for detection of hydrocarbon contaminants. **Near surface geophysics**. 1. 131-137. 10.3997/1873-0604.2003003, 2003.
- GUEDES, M. C; OLIVEIRA.R.C.; MELÉM.N. J; SILVA.K.E. Classificação do solo e relação com densidade e produção de castanheiras na amazônia oriental, **XXXVI Congresso Brasileiro de Ciências do Solo**, 2017.
- ISSLER, R. S. et al. *Geologia da Folha SA. 22-Belém*. Brasil. DNPM. Projeto RADAMBRASIL, p. 1079, 1974.
- JAYAWICKREME, D. H., R. L. VAN DAM, AND D. W. HYNDMAN. Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions, **Geophys. Res. Lett.**, 35, L18404, doi:10.1029/2008GL034690, 2008.
- LAKSHMI, V., E. F. WOOD, AND B. J. CHOUDHURY. Evaluation of Special Sensor Microwave/Imager satellite data for regional soil moisture estimation over the Red River Basin. *Journal of Applied Meteorology* 36:1309–1328, 1997.

- LOKE, M. H., R. D. BARKER. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-newton method, **Geophy. Prospect.**, 44, 131 – 152, 1996.
- LOKE, M. H. Resdinv rapid 2d resistivity and ip inversion using least-squares methods. **User manual. Austin Tex., Advanced Geosciences, Inc.**, 66 p., 1998.
- RABELLO, L. M. Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos. São Carlos: **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, 2009. 19 p.
- KAINER, K.A., WADT, L.H.O., STAUDHAMMER, C.L. Explaining variation in brazil nut fruit production. **Forest Ecology and Management**; 250(3): 244-255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.024>, 2007.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. Geofísica de exploração. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2009.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. Aterramento elétrico. 3. ED. Rio Grande do Sul: **Sagra D.C Luzzatto**, 1995.
- MAXIMO, O. A.; SAAD, A. M.; KUX, H. H. Estimativa do teor de água no solo utilizando dados de radar de abertura sintética. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 745-752, Sept. 1999. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06831999000300030&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06831999000300030&lng=en&nrm=iso)>. access on 08 Aug. 2020.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Unidade de conservação: Reserva Extrativista do Rio Cajari. **Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Departamento de Áreas Protegidas**.
- NASCIMENTO, C. T. C.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A. V. Variação sazonal da resistividade em latossolos. In: **XVIII International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, Rio de Janeiro, Brazil, 2003.
- OLSSON, P.A., TINGSTRUP, I., JAKOBSEN, I., BAATH, E. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. **Soil Biology and Biochemistry** 31, 1879–1887, 1999.
- REYNOLDS, J. M. Un introduction to applied and environmental geophysics. **2ª ed. UK: Wiley-Blackwell**, 2011.
- SANTOS, R.D., CURI, N., SHIMIZU, S.H. Guia prático para classificação de solos brasileiros, 1. ed. Produção independente - Publicado pelos Autores, Lavras, pp. 82p, 2015.
- SCOLES, R., GRIBEL, R. Population structure of brazil nut (*bertholletia excelsa*, lecythidaceae) stands in two areas with diferente occupation histories in the brazilian amazon. **Hum. Ecol.** 39 (4), 455–464, 2011.
- SILVA, R. R.; NASCIMENTO, C. T. C. Visualização da propagação da umidade no solo por meio da eletrorresistividade. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.

SOBRINHO, T.R.G. Estrutura, funcionamento e evolução das paisagens cobertas por savanas na reserva extrativista do rio cajari-ap, amazônia oriental. Tese (Doutorado em Geografia) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2017.

VISACRO, S. Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento,” **Artiliber Editora**, São Paulo, 2002.  
VOGELSANG, D. Environmental Geophysics, a Practical Guide. **Springer-Verlag**, Berlin, 1995.

WALKER, J. P., AND HOUSER, P. R. Evaluation of the OhmMapper instrument for soil moisture measurement. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 66, 728–734, 2002.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* s.t. blake no município de Santa Maria RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 177-183, mar./abr. 2003.

WOOD, E. F. Advances in land surface modeling, U.S. Natl. Rep. Int. Union Geod. Geophys., 1987-1990, Rev. **Geophys.**, 29, 193-201, 1991.

**CAPÍTULO 2- RELAÇÕES ENTRE RESISTIVIDADE DO SOLO SOB FLORESTA  
COM CASTANHEIRAS (*Bertholletia excelsa* BONPL), BIOMASSA DE RAÍZES  
FINAS E ATRIBUTOS DA FERTILIDADE**

## **CAPÍTULO 2- Relações entre resistividade do solo sob floresta com castanheiras (*Bertholletia excelsa* Bonpl), biomassa de raízes finas e atributos da fertilidade**

### **RESUMO**

Estudos sobre raízes associados aos atributos do perfil do solo são onerosos e isso leva à busca por métodos não destrutivos que possam colaborar nessa avaliação. Para isso, métodos geofísicos, como a eletrorresistividade, podem ser uma alternativa. O entendimento da distribuição da biomassa de raízes finas e as relações com outros atributos do solo, como a umidade e matéria orgânica, é importante para subsidiar estudos sobre absorção de nutrientes. Algumas espécies de maior porte, como a castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonp.), necessita de elevados aportes de nutrientes para sua manutenção. O presente estudo teve como objetivo utilizar o método geofísico eletrorresistividade para avaliar como os atributos de fertilidade (umidade, matéria orgânica, argila e areia) estão correlacionados com a resistividade elétrica e com o acúmulo de raízes finas na área da Reserva Extrativista do Cajari – Resex Cajari – AP. Foram coletadas amostras de terra para caracterização de atributos como umidade, matéria orgânica, argila e areia. As raízes finas foram coletadas de monololitos de solo. Para a obtenção dos dados geofísicos foi utilizado o método eletrorresistividade com caminhamento elétrico no arranjo dipolo-dipolo. Os resultados obtidos demonstraram que os modelos apresentaram valores de resistividade baixos, perceptível principalmente nos primeiros 25 centímetros da camada superficial do solo e ao longo das linhas, chegando a, aproximadamente, 220  $\Omega$ .m. Essas áreas com menor resistividade apresentaram uma maior concentração de raízes finas. Com os resultados obtidos foi possível verificar fatores que podem colaborar com a variação de resistividade, como a matéria orgânica e argila. Nos pontos onde ocorreu uma maior concentração desses atributos a resistividade foi menor e a biomassa de raízes finas foi maior, com elevados coeficientes de correlação entre as variáveis. Assim, foi possível demonstrar que o método geofísico eletrorresistividade é eficaz para detectar áreas de baixa resistividade em ambientes florestais, propiciando pontos de coletas mais precisos sem agredir o solo local.

Palavras Chave: Eletrorresistividade; umidade do solo; matéria orgânica, Resex Cajari.

## ABSTRACT

Studies on roots associated with soil profile attributes are expensive this leads to the search for non-destructive methods to collect soil data. For this purpose, geophysical methods can be an alternative. Soil data may provide the understanding of nutrient absorption based on the distribution of thin-root biomass and the relationships with attributes, such as humidity and organic matter. Some larger species, such as the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Bonp.) require high amounts of nutrients for their maintenance. The present study aimed to use the geophysical electroresistivity method to understand how fertility attributes (humidity, organic matter, clay and sand) are correlated with electrical resistivity and the accumulation of fine roots at the Cajari Extractive Reserve - Resex Cajari - AP. Soil samples were collected to characterize attributes such as humidity, organic matter, clay and sand. I used the electrical profiling to obtain the geophysical data. The fine roots were collected from soil monoliths. The results showed low resistivity values, mainly in the first 25 centimeters of the topsoil and along the lines, reaching approximately 220  $\Omega$ .m. Those areas with low resistivity showed a higher concentration of fine roots. The results showed that is possible to correlate variation of resistivity with the organic matter and clay. At the points where there was a great concentration of these attributes, the resistivity was lower and the biomass of fine roots was higher, providing high correlation coefficients between the variables. Thus, it was possible to demonstrate that the geophysical electroresistivity method is effective to detect areas of low resistivity in rainforest environments, affording more accurate data without harming the local soil.

Key words: Electroresistivity; soil humidity; organic matter, Resex Cajari.

## 1. INTRODUÇÃO

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl. – Lecythidaceae) é uma espécie nativa da Amazônia que está entre as maiores árvores do planeta. Encontrada na região norte do Brasil, na Guiana Francesa, Suriname, entre outros (THOMAS, 2014), ocorre em toda a região conhecida como Pan-Amazônia. A comercialização de suas amêndoas representa atividade econômica basicamente extrativista, muito importante para populações tradicionais locais. Devido aos altos teores de selênio encontrados nas amêndoas (KLUCZKOVSKI et al., 2015), a castanha-da-amazônia funciona como alimento funcional, contribuindo na prevenção de doenças (RAYMAN, 2002; HUGUENIN et al., 2015).

Devido ao seu grande porte e importância, a castanheira é uma espécie que tem sido alvo de vários estudos. Inclusive para entender se os atributos do solo como matéria orgânica, umidade, e a disponibilidade de nutrientes podem estar vinculados ao seu crescimento e à produção de frutos (VIANA et al., 1998; ZUIDEMA, 2003).

O conhecimento dos atributos do solo, como o teor de matéria orgânica, umidade, biomassa de raízes e sua distribuição, é um importante aspecto para entender o funcionamento do ecossistema (AZEVEDO, 2014). Esse conhecimento auxilia no entendimento das relações existentes entre as raízes, a parte aérea das plantas e as características edáficas. Isso é relevante, principalmente, no que se refere aos padrões de absorção de água e nutrientes por parte dos indivíduos (SAINJU E GOOD, 1993). No caso das raízes finas, sua maior importância está diretamente relacionada com a absorção dos nutrientes, na medida em que os mesmos não são absorvidos pelas raízes grossas (AZEVEDO, 2014).

Para que ocorra um bom desenvolvimento do sistema radicular de uma árvore, é necessário o recebimento de quantidades equilibradas de metabólitos sintetizados na parte aérea. Além disso, a raiz necessita de um meio adequado para se desenvolver e suprir a planta de água e nutrientes. O desenvolvimento das raízes em ambientes florestais pode ser afetado tanto por aspectos químicos, quanto físicos e biológicos do solo (ANDRADE, 1997).

Várias características do solo e da forma como ele é manejado podem prejudicar o desenvolvimento radicular. Por exemplo, a diminuição da porosidade devido ao adensamento natural formado por processos pedológicos ou por compactação devido ao manejo, a toxicidade de alguns elementos químicos, a falta de nutrientes e até mesmo o excesso de água (DEMATTE, 1981).

A concentração e a extensão das raízes que se desenvolvem em diferentes condições ambientais estão diretamente relacionadas com as características físicas e químicas do solo, com os fatores genéticos de cada espécie, com o balanço da relação entre a parte aérea e a parte radicular, com o manejo do solo e da vegetação (TICKTIN, 2004; WUNDER ET AL., 2014). Algumas espécies arbóreas apresentam crescimento vigoroso em solos de baixa fertilidade, o que provavelmente é devido ao extenso sistema radicular que desenvolvem, explorando grande volume de solo (PRITCHETT, 1979). Tal aspecto também pode ser atribuído à eficiência das espécies na utilização dos nutrientes disponíveis.

Cada espécie arbórea tem uma forma radicular herdada, dependendo das suas características genéticas e do substrato onde as raízes se desenvolvem. No entanto, alterações na produção de biomassa e arquitetura radicular poderão aparecer no decorrer do tempo, em função da idade ou fase de desenvolvimento (ATKINSON, 1983).

Os estudos sobre o sistema radicular de árvores em uma floresta são escassos. A quantificação da biomassa radicular é de grande relevância para a compreensão das características do solo (MELO; GONÇALVES, 2008). Na literatura, alguns autores enfatizaram a necessidade de realização de um número maior de estudos da biomassa radicular, sugerindo, entre outras, utilização de ferramentas promissoras para superar a complexidade destes estudos e os problemas técnicos advindos das dificuldades de obter amostras e entender o que pode ocasionar o desenvolvimento de raízes finas na subsuperfície (SNOWDON et al., 2000). Estudos nos quais se avalia a biomassa subterrânea são importantes, pois contribuem para ampliar o conhecimento sobre o funcionamento das florestas tropicais. Algumas estimativas atuais de biomassa florestal contêm incertezas principalmente quando se fala em um método adequado para entender os fatores que podem estar ocasionando tal desenvolvimento (AMATO et al., 2008).

Para ajudar no entendimento do perfil do solo e dos aspectos abaixo da camada superficial da serapilheira, os métodos geofísicos podem ser utilizados. Esses métodos apresentam técnicas indiretas de investigação das estruturas presentes na subsuperfície através da aquisição e interpretação de dados instrumentais, caracterizando-se, portanto, como métodos não invasivos e não destrutivos. Essa metodologia permite avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais em sub superfície, como, por exemplo, a condutividade ou resistividade elétrica, permissividade dielétrica, susceptibilidade

magnética e densidade, que podem ter como origem as diferenciações litológicas e outras heterogeneidades, naturais ou não (LOKE, 2013).

A umidade do solo, juntamente com alguns fatores, como o tipo de solo, temperatura, compactação, composição e concentração química dos sais dissolvidos na água retida nos poros, podem influenciar a resistividade elétrica do meio investigado (REYNOLDS, 2011; KINDERMANN et al., 1995). A resistividade elétrica é o parâmetro físico inerente ao método geofísico de eletrorresistividade, utilizado na avaliação de propriedades físicas e químicas de solos de florestas e lavouras, sendo útil na agricultura de precisão para mapear características de pequena e/ou grande escala dentro do perfil do solo (REYNOLDS, 2011). O método é não invasivo e pode ser aplicado com a técnica de caminhamento elétrico, utilizando arranjos de eletrodos dos tipos dipolo-dipolo, Schlumberger, polo-dipolo e Wenner, na avaliação lateral e em profundidade da distribuição de resistividade dos solos de florestas ou cultivados. Atualmente, é útil na agricultura de precisão para mapear características de pequena e/ou grande escala dentro do perfil do solo (BESSON et al., 2004; AL HAGREY, 2007).

Delimitadas espacialmente as anomalias de resistividade elétrica em subsuperfície, é possível inferir posições na superfície do terreno para procedimentos de coletas de amostras de solos para estudo de propriedades físicas (umidade, compactação, tipo de solo). Após análise, esses dados podem subsidiar tomadas de decisões no manejo da área, quanto a intervenção de nutrientes, defensivos agrícolas e irrigação. Assim, a geofísica permite a identificação e caracterização de características do solo, em diferentes espaços e tempos.

O entendimento do perfil do solo e dos aspectos abaixo da camada superficial de serapilheira, presente em florestas, pode ser acessado pelo método eletrorresistividade e utilizado para compreender as características de uma cultura ou reflorestamento (AMATO et al., 2008; REYNOLDS, 2011). Esses autores relatam isso, em relação ao desenvolvimento de raízes e na caracterização hidrogeológica, como profundidade do nível freático, determinação das espessuras dos estratos geológicos e localização de zonas de solos saturados por água.

Através do processo de inversão, é possível visualizar o progresso de uma pluma de água em Latossolo, comprovando aumento progressivo da umidade do solo relacionado à área de baixa resistividade. Esses resultados evidenciaram a aplicabilidade do método de eletrorresistividade para visualização do avanço da umidade do solo em um período de quatro horas (SILVA E NASCIMENTO, 2013). Outro estudo, utilizando o método em uma área de conservação ambiental em Brasília, mostrou que a variação de resistividade é maior em solos arenosos do que em solos predominantemente argilosos, e que solos ricos

em argila são mais condutivos que solos arenosos, independentemente da condição de umidade (Nascimento, Pires e Moraes, 2003).

A tomografia por resistividade elétrica também já foi utilizada para realizar estudo não invasivo de raízes de árvores, verificando sua distribuição espacial em um solo agrícola (AMATO ET AL., 2010)

Dentro desse contexto, será testada a hipótese que a resistividade elétrica pode ser utilizada para avaliar áreas úmidas em floresta com castanheiras, e as condições do solo que favorecem o acúmulo de raízes finas. Neste sentido, foi objetivo do presente estudo fazer uso do método geofísico eletrorresistividade para avaliar como os atributos de fertilidade (umidade, matéria orgânica, argila e areia) estão correlacionados com a resistividade elétrica e o acúmulo de raízes finas na área de estudo.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de Estudo**

A pesquisa foi realizada na Bacia Hidrográfica do Rio Cajari, região centro-norte e nordeste da Unidade de Conservação (UC) Reserva Extrativista do Rio Cajari/AP (Figura 1). A Resex Cajari compreende os municípios de Mazagão-AP (44,45% da UC), Laranjal do Jari-AP (38,67% da UC) e Vitória do Jari-AP (16,88% da UC). Suas principais bacias hidrográficas são a do Rio Cajari, Rio Ajuruxi, Rio São Luís, Rio Muriacá, Igarapé Ariranha e Igarapé Tambaqui, todas fazendo parte da Bacia do Rio Amazonas (SOBRINHO, 2017).

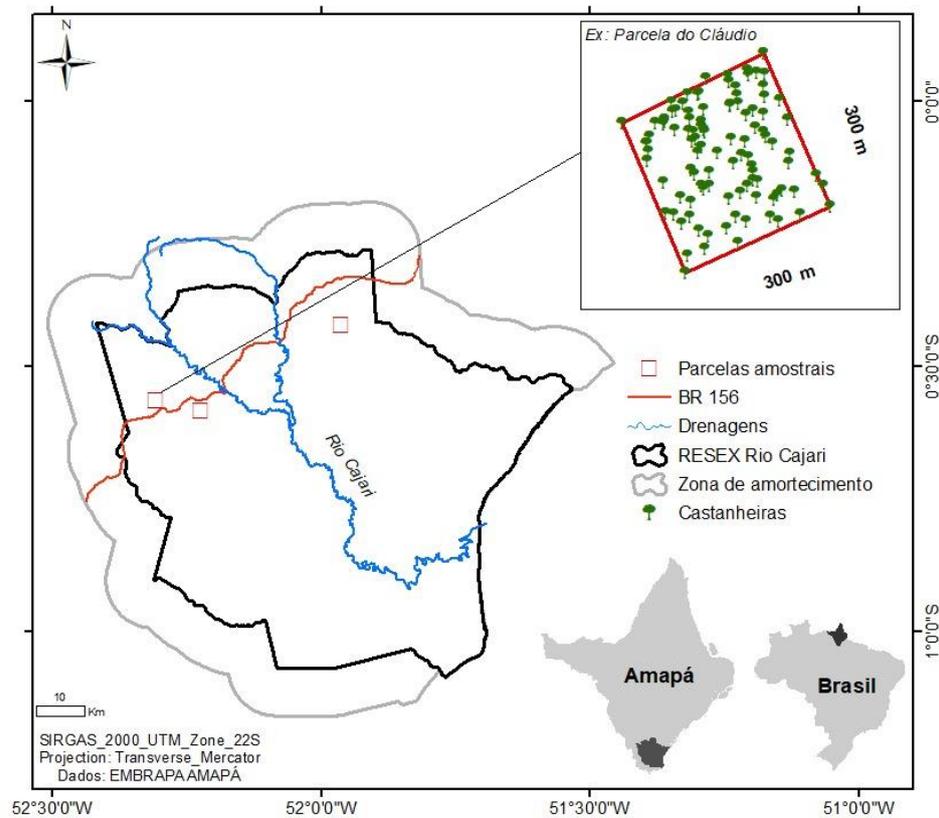


Figura 1-Localização da área de estudo – Estado do Amapá e Resex do Rio Cajari, com a parcela amostral onde ocorrem as castanheiras.

Com uma área que se aproxima de 502.000 ha, a Reserva Extrativista do Rio Cajari é uma Unidade de Conservação federal, de uso sustentável sob vigilância do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), órgão vinculado ao Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA) (SOBRINHO, 2017). O acesso da reserva ocorre por via terrestre ou fluvial. Por via terrestre o acesso é feito pela BR-156 (trecho sul), através das entradas ao norte ou a oeste da reserva. Pelo rio, o acesso acontece pelo Canal Norte (foz do Rio Amazonas) (SOBRINHO, 2017).

A reserva tem como um de seus principais objetivos utilizar de maneira sustentável os recursos naturais pela população extrativista do local, conservando a biodiversidade e junto a isso protegendo os meios de vida e a cultura dos residentes. Entre suas características encontram-se paisagens cobertas por savanas e matas fechadas de vegetação ombrófila, havendo várias espécies de plantas, entre elas a castanheira-da-amazônia (Figura 1) (SOBRINHO, 2017).

O clima da Resex Cajari, está na transição entre o clima tropical da savana (Aw) e o clima tropical clima de monção (Am), predominando o Am na maior parte (ALVARES et al.,

2013). A região apresenta média temperatura anual de 25 ° C, com média das mínimas de 18 ° C e das máximas de 31,5 ° C. A precipitação anual é de aproximadamente 2300 mm, com uma longa estação chuvosa de dezembro a junho. De acordo com o sistema brasileiro de classificação do solo, a antiga floresta de terra firme de Resex Cajari apresenta principalmente Latossolos (SANTOS et al., 2015). A local de estudo na Resex Cajari está, aproximadamente, 150 m acima do nível do mar.

A área amostral foi uma parcela permanente de 300 m x 300 m, localizada em floresta ombrófila com ocorrência de 99 castanheiras-da-amazônia. As avaliações e coletas foram realizadas no período de 4 a 6 de maio de 2019, em cinco pontos amostrais dentro da parcela. O delineamento amostral foi sistematizado de acordo com o croqui da figura 2, onde foram realizados levantamentos de resistividade, coletas de solo, terra e de raízes finas, nesse período típico de inverno amazônico.

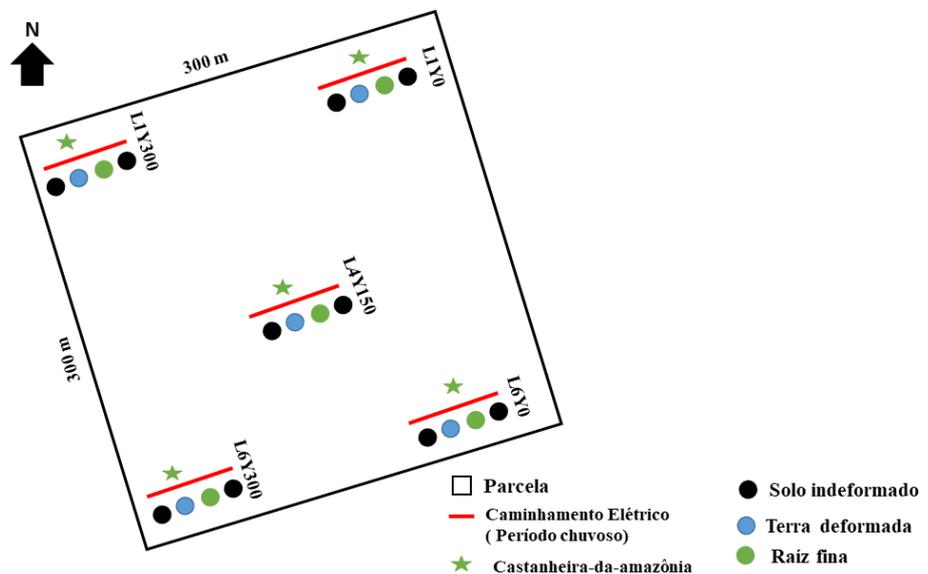


Figura 2- Croqui da parcela com castanheiras, onde foram realizados os cinco levantamentos geofísicos, coleta de solos e coleta de raiz, durante o período de inverno amazônico (05/2019), na Resex do rio Cajari – região sul do Estado do AP.

## 2.2 Coleta de raízes finas e solos

As coletas de raízes e solos foram realizadas a, aproximadamente, 60 cm das linhas de eletrorresistividade, com o intuito da coleta do material ser realizada próximo à castanheira e ao caminhamento. Para extração das amostras de raízes foi utilizada uma caixa de aço com borda cortante, para facilitar a extração de um monolito (Figura 3) de solo, com dimensões de 20 cm x 20 cm x 20 cm. O instrumento foi inserido manualmente no solo com o auxílio de uma marreta para facilitar sua penetração, possibilitando o corte das raízes. Após a obtenção das amostras, estas foram armazenadas em sacos plásticos devidamente identificados e levadas ao laboratório da Embrapa Amapá, para realizar a separação das raízes do solo, de acordo com Witschoreck et al. (2003)



Figura 3- Utilização de caixa de aço com borda cortante, para coleta de monolito de solo e quantificação das raízes finas, em floresta com castanheiras na Resex Cajari.

A terra foi separada das raízes finas utilizando duas peneiras sobrepostas como apresentado nas figuras 4a, e 4b. Para realizar a separação, pequenas porções das amostras foram colocadas na peneira, lavadas com jatos d'água e separadas as raízes da terra com o auxílio de uma espátula. O procedimento foi repetido três vezes com o intuito de não haver perda de amostra de raiz que, possivelmente, ainda se encontrasse inserida na terra. São consideradas raízes finas aquelas com até 2mm de diâmetro, sendo descartadas aquelas que não se encontravam nessa classificação determinada por Witschoreck et al. (2003). O excesso de umidade das raízes devido a lavagem foi retirado com papel toalha (Figura 4c) e logo depois as mesmas foram pesadas em uma balança de precisão (Figura 4d), para determinação da massa úmida.



Figura 4- Procedimento de separação, secagem e pesagem de raízes finas.

A coleta de solo indeformado para analisar a porcentagem de umidade da área de estudo foi realizada com o auxílio de cilindros metálicos (Figura 5) com tampas, de aproximadamente 98 cm<sup>3</sup>. As amostras foram retiradas do solo de maneira manual, com auxílio de uma marreta de borracha, uma faca, e um batedor para não danificar os cilindros. Foram coletadas duas amostras ao lado de cada linha onde estavam sendo realizados os caminhamentos elétricos, totalizando dez amostras de solos indeformados. Após coletadas, as amostras foram devidamente identificadas e levadas para o laboratório da Embrapa Amapá, onde foram devidamente pesadas em balanças de precisão e secas em estufa de ventilação forçada, a 105°C, por 24 h. Após secagem, as amostras foram pesadas novamente para a determinação da porcentagem de umidade. O valor da porcentagem de umidade do solo foi determinado retirando-se a média do percentual de umidade coletado em cada ponto amostral (n = 2).



Figura 5- Cilindros com tampas, contendo amostras úmidas indeformadas de solo, e cilindro com amostra seca sendo pesado em uma balança de precisão.

Em seguida foram coletadas cinco amostras deformadas de terra para avaliar a concentração de matéria orgânica, argila e areia presentes no local, com auxílio de trado holandês (Figura 6), na profundidade de 0 a 10 cm, a aproximadamente 60 cm ao lado da linha de caminhamento elétrico. As amostras foram devidamente alocadas em sacos plásticos, identificadas e levadas para o laboratório de solos da EMBRAPA-AP. Em laboratório foram analisados parâmetros físicos das amostras, como fração de areia e argila, e também o teor de matéria orgânica, normalmente utilizados em análises de rotina para avaliação da fertilidade do solo, no entanto o trabalho utiliza esses parâmetros para tentar entender se os mesmos podem alterar a resistividade do local. Todos os processos metodológicos, tanto de coleta quanto laboratoriais seguiram as normas da Embrapa (2005).



Figura 6- Coleta com trado holandês de amostra deformada de solo em área de floresta com castanheiras na Resex Cajari.

### 2.3 Coleta de dados da resistividade elétrica

O método de eletrorresistividade tem como princípio a passagem pelo solo de uma corrente elétrica de intensidade  $I$  (A), transmitida por um par de eletrodos adjacentes (dipolo AB), conectado a uma fonte de corrente de baixa frequência. Tomando-se a medida da diferença de potencial  $\Delta V$  (V), entre dois outros eletrodos vizinhos de recepção (dipolo MN), pode-se calcular a resistividade aparente  $\rho_a$  ( $\Omega \cdot m$ ), dada por (REYNOLDS, 2011):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Onde  $K$  é o fator geométrico do arranjo geral do quadrípolo (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009) que depende somente das posições de injeção de corrente e de medida do potencial.

A quantidade calculada pela equação (1) é conhecida como resistividade aparente, pois na prática, os ambientes geológicos comuns não podem ser considerados homogêneos, pois possuem variações de resistividade tanto na vertical como na horizontal (meio não homogêneo e anisotrópico). O conceito de resistividade aparente é de fundamental importância na geofísica aplicada, pois é a variável experimental que expressa os resultados das medições do método de eletrorresistividade, e a que se toma como base para o processo de inversão e para a interpretação.

Na área de estudo, parcela de dimensões 300 m x 300 m, contendo castanheiras, entre os dias 4 a 6 de maio de 2019 (período mais chuvoso do inverno amazônico) foram realizadas

medidas de resistividade ( $\rho_a$ ), em cinco linhas, denominadas L1Y0 e L1Y300 (solo argilo-arenoso) L4Y150 (solo argilo-arenoso) e L6Y0 e L6Y300 (areno-argiloso). Utilizou-se a técnica de caminhamento elétrico, com o arranjo dipolo-dipolo, para verificar a variação lateral de resistividade do meio, tendo na configuração dipolo-dipolo, a constante geométrica  $K$  igual a (REYNOLDS, 2011):

$$K_{da} = 2\pi a \frac{1}{\left(\frac{1}{n} + \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)} \quad (2)$$

Onde  $a$  é a distância entre os dipolos de corrente e de potencial, dispostos em um mesmo alinhamento e posicionados externamente, e  $n = 1, 2, 3, 4$  e  $5$  é o número de dipolos MN. Assim, a profundidade de investigação progressivamente cresce com o crescimento da distância entre os dipolos de corrente e de potencial ( $E$ ), figura 6.

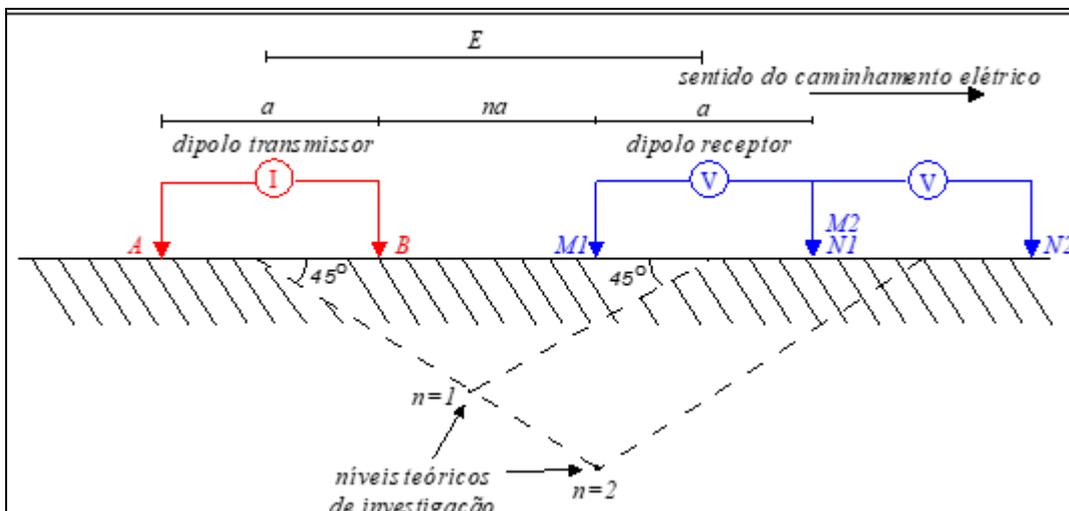


Figura 7- Disposição dos eletrodos em campo para a aplicação do arranjo dipolo-dipolo.

O arranjo dipolo-dipolo foi utilizado por apresentar boa resolução lateral e baixo acoplamento eletromagnético entre os circuitos de corrente e de potencial (LOKE, 1998). O arranjo dipolo-dipolo é muito sensível às mudanças horizontais na resistividade, mas relativamente insensível às mudanças verticais na resistividade. Isso significa a conveniência em mapear estruturas verticais, como a direção preferencial do fluxo de água induzida por fissuras no solo (LOKE; BARKER, 1996). Foram usados espaçamentos constantes entre os eletrodos, iguais a 0,5 m, com cinco níveis de amostragem ( $n$  mudado 5 vezes) para obter adequada profundidade de investigação e resolução lateral, ao longo de 5 linhas de 17 eletrodos, alinhados na superfície do solo com o comprimento da linha de 8m. Uma trena colocada sobre o terreno foi usada para controlar o intervalo entre os eletrodos. O equipamento utilizado foi o resistivímetro SARIS, fabricado pela empresa canadense Scintrex (Figura 8). O tempo de

injeção e relaxamento de corrente utilizado foi de 2 s. Na figura 9, observam-se os instantes durante os trabalhos de campo.



Figura 8– Resistivímetro SARIS utilizado nas medidas de resistividade elétrica na área de estudo.



Figura 9- Andamento do trabalho de campo na obtenção das medidas de resistividade elétrica na parcela de floresta de castanheira na Resex Cajari.

As medidas obtidas de resistividade aparente foram processadas através do programa computacional RES2DINV, que adota uma técnica rápida e eficiente para inversão de dados de resistividade (LOKE, 1998), baseada no método dos mínimos quadrados com suavização restringida. Os processos de inversão de dados de resistividade buscam estabelecer um modelo da provável distribuição real dos valores de resistividade elétrica em subsuperfície, partindo de um modelo de estimativa inicial, construído diretamente a partir das medidas de campo.

Para ter um entendimento mais abrangente da resistividade do local, foi retirada a média dos valores dos 25 primeiros centímetros do modelo real de distribuição de resistividade, já que nessa profundidade se concentram as raízes finas (WITSCHORECK et al., 2003). Esses valores médios foram utilizados para fazer as análises de correlação e verificar se naquela área onde ocorria uma saturação mais elevada, a concentração de raízes era mais abundante.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A figura 10 apresenta os modelos reais de distribuição de resistividade realizados nos pontos de coleta L1Y0, L1Y300, L4Y150, L6Y0 e L6Y300. Os modelos apresentam valores de resistividade baixos, menores que 300  $\Omega$ .m, principalmente nos primeiros 25 centímetros da camada superficial do solo e ao longo da de toda extensão superficial dos modelos (Figuras 10 **a,b,c,d,e**).

Os modelos de resistividade das linhas L1Y0 e L1Y300 mostram poucas variações em sua subsuperfície, se mantendo em aproximadamente 211  $\Omega$ .m. Isso é observado ao longo da extensão do modelo real, onde ambos sofreram variações de resistividade a partir da profundidade 0,5 m alcançando nessa área resistividade de 1275  $\Omega$ .m.

No entanto, é possível perceber a presença de áreas com uma resistividade relativamente elevada, principalmente, à medida que se alcança maiores profundidades. Essa alta condutividade é percebida principalmente no modelo da figura 10 (c), onde a partir dos 2 metros da linha e das profundidades de 0,436 até 0,850 m, a resistividade variou de 1246 a 2200  $\Omega$ .m.

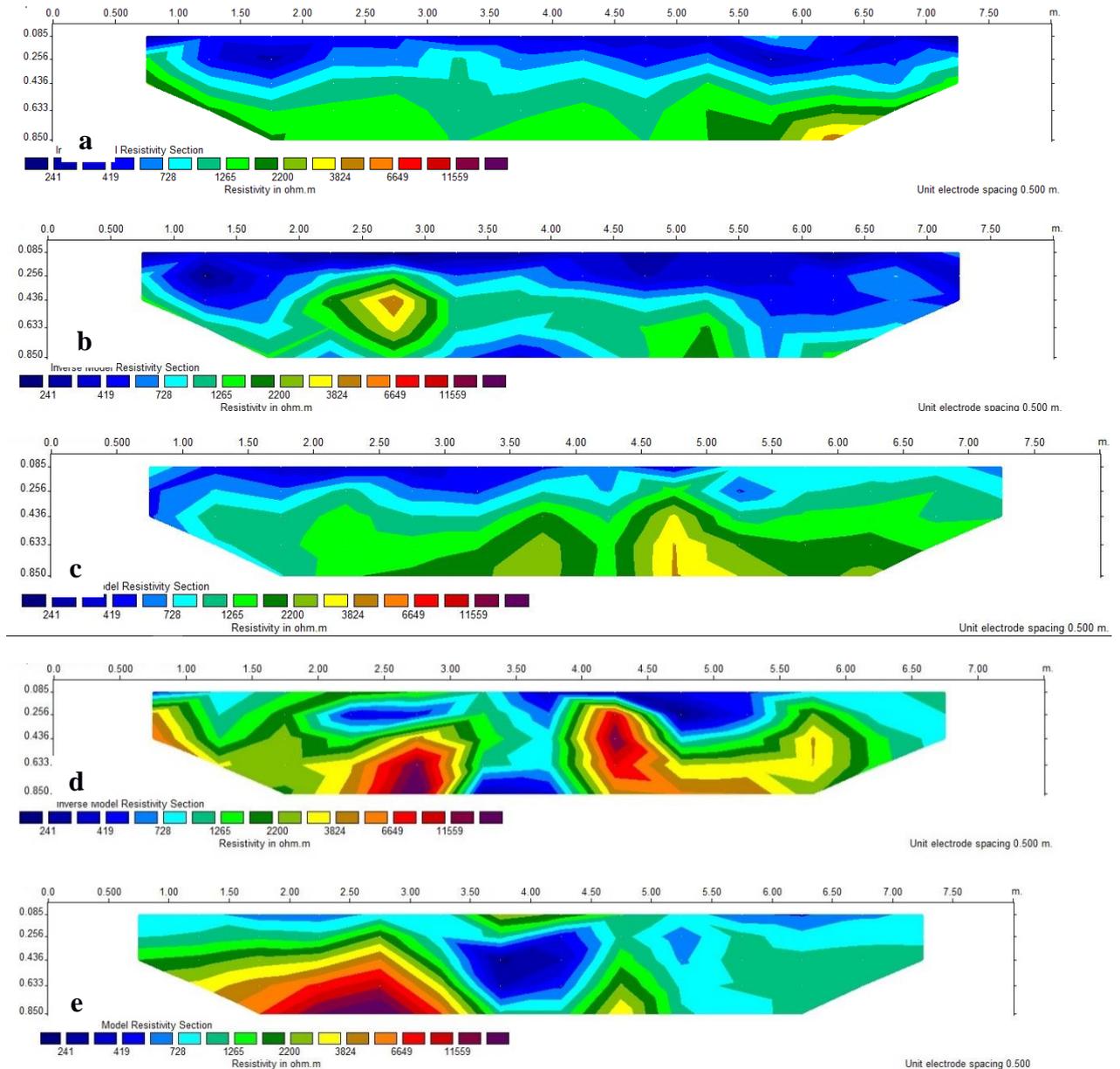


Figura 10- Modelo de distribuição de resistividade das linhas: L1Y0 (a); L1Y300 (b); L4Y150 (c); L6Y0 (d); L6Y300 (e), em uma área de floresta com presença de castanheiras, na Resex do Cajari-AP, Amazônia oriental.

Nos modelos das linhas L6Y0 e L6Y300, respectivamente, figuras 10(d) e 10(e), há presença de áreas com resistividades relativamente elevadas, acima de  $3824 \Omega.m$ , principalmente, à medida que se alcança as maiores profundidades, acima de 40 cm.

As mudanças do parâmetro resistividade estão relacionadas as heterogeneidades do solo da área, já que essa apresenta em sua textura proporções variadas de areia e argila, assim como, a presença de matéria orgânica nas profundidades iniciais do solo. As variações de

resistividade são de grande importância para inferir a caracterização do solo, podendo identificar, por exemplo, solos mais argilosos ou arenosos (NASCIMENTO et al., 2003).

Segundo Gallas (2000), a umidade presente no solo é a relação entre a massa de água e a dos sólidos nele contido, e os valores de resistividade podem ser diretamente influenciadas pela quantidade de umidade presente no ambiente. Essas mudanças de resistividade podem estar relacionadas à grande presença de matéria orgânica que existe na superfície da área de estudo o que impede a penetração de luz solar direta na superfície do solo. Além disso, áreas menos condutivas podem estar relacionadas com a presença de raízes com características mais grossas, e essas, ao contrário das finas, possuem menor condutividade devido a sua estrutura (AMATO et., al 2008).

Assim, ao analisar os modelos é possível perceber que os valores obtidos durante o inverno amazônico demonstraram em suas subsuperfícies locais com baixas resistividade, com o aumento desta à medida que a profundidade se eleva. Esse aumento de resistividade pode ser explicado devido às próprias características do solo local, como matéria orgânica, argila e areia onde esses parâmetros apresentam resistividades distintas (LOKE, 2003).

Outro fator de suma importância que pode estar relacionado a essa baixa resistividade ao longo dos modelos das linhas é a presença de castanheira na área. Uma possível explicação para a baixa resistividade nos primeiros 25 cm dos modelos 2D, é a capacidade de troca catiônica (CTC) que gera nutrientes para a castanheira-da-amazônia, e a consequente absorção pelas raízes finas da espécie (WITSCHORECK et al., 2003), ocasionando a baixa resistividade elétrica, principalmente nas profundidades iniciais do solo.

Na tabela 2, observam-se os dados de biomassa de raízes finas e atributos de fertilidade do solo, assim como, as médias de resistividade elétrica.

Tabela 2- Valores das médias encontradas ao longo dos 25 cm de profundidade do modelo real de distribuição de resistividade, massa de raiz e atributos do solo com seus respectivos valores obtidos em uma área de floresta com a presença de castanheira na Resex do Cajari.

Pontos de coleta	Média dos valores de resistividade $\Omega.m$	Massa de raiz fina úmida (g)	Matéria Orgânica ( $g.kg^{-1}$ )	Areia Grossa ( $g.kg^{-1}$ )	Umidade (%)	Argila ( $g.kg^{-1}$ )
L1Y0	381	26	19,62	615	23,65	165
L1Y300	477,16	22,53	17,72	650	22,8	156
L4Y150	557,73	17,8	13,52	670	15,55	152
L6Y0	756,54	14,4	12,59	690	15,8	148
L6Y300	869,81	10,8	10,34	695	14,75	146

As médias foram obtidas pelos valores de resistividades dos modelos reais de resistividade (Figura 10), distribuídos da superfície do solo até 25 cm de profundidade. Os valores de biomassa de raízes finas demonstram, relativamente aos outros pontos de coleta, que sua maior concentração ocorreu nas áreas onde as médias de resistividade foram menores, pontos de coleta L1Y0 e L1Y300. Os valores das médias de resistividade encontrados em L6Y0 e L6Y300, respectivamente, 14,4 e 10,8g, demonstram-se mais resistivos, tendo a concentração de biomassa de raiz fina menor nessas duas áreas. A figura 11 mostra o gráfico de correlação entre as médias de distribuição de resistividade e a biomassa de raiz fina coletada no local de estudo.

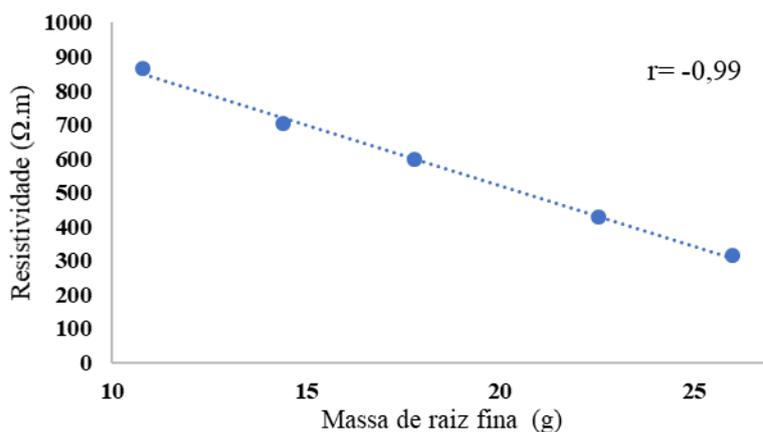


Figura 11- Relação de massa de raiz com as médias dos valores de resistividade de uma área de floresta com a presença de castanheira-da-amazônia na Resex Cajari.

É notório que a concentração de massa de raiz fina foi maior onde a média de distribuição de resistividade foi mais baixa. É possível perceber uma forte correlação inversa ( $r = -0,99$ ;  $p < 0,001$ ) entre a resistividade e massa de raiz fina, e alto grau de significância estatística da relação entre os dois parâmetros analisados.

Esse resultado corrobora estudo realizado por Amato et al. (2008) para entender a distribuição de raízes onde ocorria a presença de árvores em um pomar. Os autores também demonstraram que a concentração de raízes finas era mais densa onde a resistividade apresentou menores valores, entre 7,7 a 700  $\Omega.m$ . A concentração de raízes finas na camada subsuperficial do solo favore a absorção de nutrientes nessa região, aumentando a troca de cátions e ânions entre a solução do solo e as raízes, e, conseqüentemente, a atividade iônica. Essa atividade cria uma solução eletrolítica na área da rizosfera, que pode, inclusive, gerar energia elétrica, em

conjunto microorganismos específicos que se desenvolvem nesse ambiente (GOWTHAM, E SUNDAR 2015). Isso ocorre devido a energia emitida para o solo pode ser capturada por microrganismos que são capazes de oxidar a matéria orgânica e transferir elétrons ricos em energia para um eletrodo. A energia transportada pelos elétrons pode ser usada como energia elétrica (GOWTHAM, E SUNDAR 2015).

Assim, o desenvolvimento das raízes finas e da absorção de nutrientes pode aumentar a condutância e diminuir a resistividade elétrica no solo. Já foi comprovado que 66% da biomassa de raízes finas ficam aglomeradas nos primeiros 20 cm do solo (WITSCHORECK et al., 2003).

Além disso, deve-se considerar que a camada orgânica resultante da decomposição dos resíduos vegetais é a principal fonte de nutrientes para raízes finas, estando esses localizados nas primeiras camadas superficiais do solo, fazendo com que as raízes se concentrem nas áreas mais superficiais (WITSCHORECK, et al., 2003).

Em relação à matéria orgânica do local de estudo, os valores obtidos na tabela 2 demonstraram que a maior quantidade desse parâmetro se deu nos pontos de menor média de resistividade. O maior valor de matéria orgânica ocorreu no ponto de coleta L1Y0 (19,62 g kg<sup>-1</sup>) e sua menor concentração (10,34 g kg<sup>-1</sup>) ocorreu em L6Y300, onde foi encontrado a maior média de resistividade.

Ao analisar o gráfico da figura 12, nota-se uma forte correlação inversa ( $r = -0,99$ ;  $p = 0,009$ ) entre a resistividade e o teor de matéria orgânica presente no local de estudo.

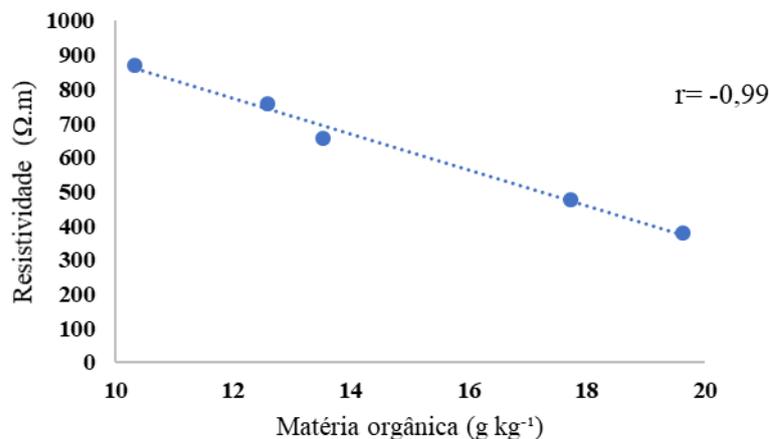


Figura 12- Relação de resistividade com a matéria orgânica presente no solo de uma área de floresta com a presença de castanheira-da-amazônia na Resex Cajari-AP, Amazônia oriental.

Os resultados apresentados acima explicam que a baixa resistividade na área de estudo, principalmente na subsuperfície, é devida à concentração de matéria orgânica nos ambientes florestais, as chamadas serapilheiras (Figura 13). Esse material evita a penetração dos raios solares diretamente no solo, dificultando a perda de água por evaporação, contribuindo para que a umidade do solo se mantenha estável, conforme, também, constatável por WITSCHORECK et al. (2003).



Figura 13- Matéria orgânica presente no local de estudo.

Quanto a resistividade correlacionada com a umidade (tabela 2), os maiores percentuais se deram onde as resistividades, relativamente foram baixas, sendo verificado o maior valor de 23,65 % no ponto L1Y0 e um menor percentual em L6Y300 (14,75%). Através da figura 14, percebe-se uma forte correlação inversa entre os dois parâmetros ( $r = - 0,94$ ;  $p < 0,001$ ), que demonstra que os percentuais de umidade mais elevados ocorreram nos pontos de menor resistividade.

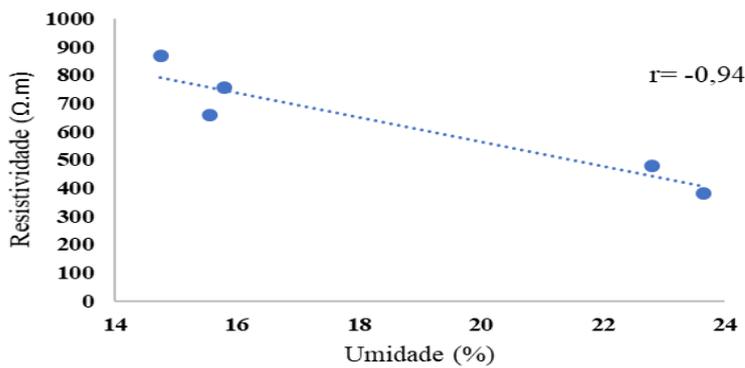


Figura 14 - Relação de resistividade e a concentração de umidade da área de estudo.

A resistividade do solo varia com a umidade nele presente. Em baixas frequências utilizadas no método de eletrorresistividade, a condução no solo se faz basicamente por mecanismos eletrolíticos (SOTO, 2004). Uma porcentagem maior de água faz com que os sais presentes no solo se dissolvam formando, dessa forma, um meio eletrolítico favorável a passagem de corrente iônica (GANDALFO et al. 2005). Assim, um determinado solo com concentração diferente de umidade, apresenta valores diferentes de resistividade. A variação da resistividade em função do teor de umidade acontece em boa parte nas camadas superficiais do solo. Apesar disso, essa variação pode alterar significativamente os valores de resistividade nos 30 primeiros centímetros da subsuperfície (GANDALFO et al. 2005).

A umidade do solo também depende de sua textura, sendo favorecida sua manutenção em áreas mais argilosas. Estudos realizados nessa área demonstraram a existência de Argissolo Vermelho Amarelo, Argissolo Acizentado e Latossolo (GUEDES et al., 2017). O Argissolo por sua vez possui uma maior capacidade de retenção de água e de nutrientes, favorecendo a ciclagem biogeoquímica e a manutenção da capacidade produtiva das castanheiras, o que pode favorecer o aumento da umidade nesses solos, principalmente no inverno amazônico (GUEDES et al., 2017).

O estudo também verificou se o teor de argila está associado com a baixa resistividade do local. Na tabela 2 percebeu-se que onde ocorre a maior concentração de argila, a média de resistividade é relativamente menor. No ponto de coleta L1Y0 onde a média de resistividade é de 381  $\Omega.m$  a concentração de argila é de 165  $g\ kg^{-1}$ , todavia no ponto L6Y300, a média de distribuição de resistividade alcançou 869,81  $\Omega.m$ , verificando o decaimento do parâmetro argila para 146  $g\ kg^{-1}$ . Na figura 15, tem-se o diagrama de dispersão da resistividade elétrica com a variável argila, onde observa-se um alto grau de correlação inversa ( $r = -0,96$ ;  $p <$

0,001) entre as variáveis. Assim, nas áreas onde ocorrem a maior concentração de argila a resistividade se mantêm mais baixa.

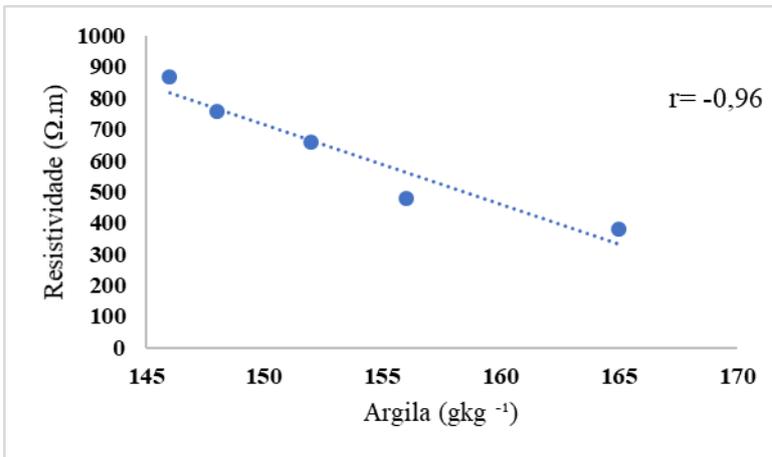


Figura 15- Relação de resistividade e a concentração de argila da área de estudo.

As argilas representam o último produto do processo de fragmentação das rochas (DHALIN, 2002). Com o intemperismo, a rocha pode transformar-se em material solto no qual torna-se possível a vida de plantas e animais. Restos como folhas caídas vão sendo adicionados e decompostas ao longo do tempo, formando matéria orgânica (LEPSCH, 2002). Ao mesmo tempo, alguns dos minerais menos resistentes ao intemperismo, vão se transformando em argilas

De acordo com Soto (2004), áreas com concentração de argila tendem a ser menos resistiva, onde os solos argilosos apresentam valores de resistividade que variam de  $1.0 \times 10^0$  a  $1.0 \times 10^2 \Omega.m$  (NASCIMENTO et., al 2003). Ao se comparar o conteúdo de argila com a média da resistividade do ambiente estudado na área florestal, a pesquisa demonstrou que a maior média de resistividade (869,81  $\Omega.m$ ) apresentou uma menor concentração de argila.

A área de estudo também apresenta características arenosas, representada pela maior concentração de areia (695 g.kg<sup>-1</sup>) encontrada no ponto de coleta L6Y300 onde a média de distribuição de resistividade foi mais elevada (869,81  $\Omega.m$ ), ao contrário da linha L1Y0 de menor média de resistividade onde a concentração de areia foi de 615 g kg<sup>1</sup>. Através do gráfico da figura 16 é possível perceber a forte correlação direta entre resistividade e conteúdo de areia, apresentando um nível de significância de ( $p = 0,01$ ), onde nota-se que a concentração de areia influencia na média de resistividade.

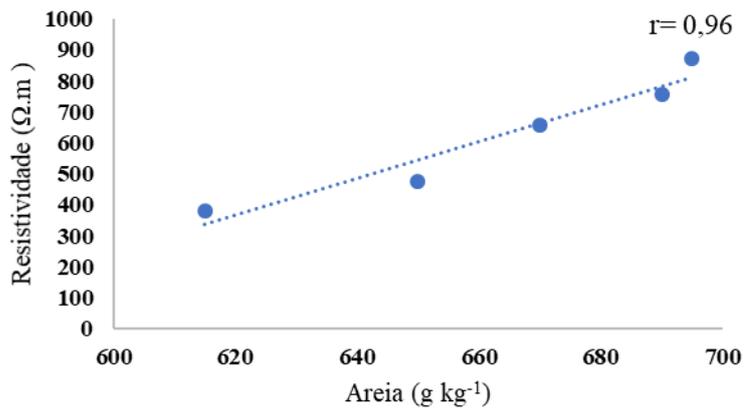


Figura 16- Relação de resistividade e a concentração de areia da área de estudo.

Assim, os resultados mostram que onde ocorre a maior concentração de areia a média de resistividade apresenta-se mais resistiva. No entanto, ao se tratar de uma área de floresta, tal resistividade pode ter sofrido interferência de outros fatores ambientais como a matéria orgânica e a argila, não alcançando elevados valores de resistividade em decorrência da areia onde essa pode alcançar até 60000  $\Omega.m$  (NASCIMENTO et. al. 2004).

Dentro do contexto desse trabalho, é possível perceber que a concentração de raízes finas ocorre onde as médias de distribuição de resistividade são baixas e influenciadas pelos parâmetros de fertilidade (umidade, areia, argila e matéria orgânica), onde têm-se relativamente alta umidade, matéria orgânica e argila. Na tabela 2, observa-se que 26 g de raiz fina ficou concentrada onde a umidade apresentou uma maior porcentagem (23,65%), tendo nesse ponto de coleta uma média de distribuição de resistividade baixa. O mesmo crescimento da concentração de raízes finas se observa relacionada aos maiores valores de argila e matéria orgânica, respectivamente, 19,62 e 165  $g.kg^{-1}$ . Em se tratando das quantidades de areia analisadas, percebe-se um decaimento da concentração de raiz fina (10,8 g) onde o conteúdo de areia é mais elevado (695  $g.kg^{-1}$ ). Na figura 17 são apresentados gráficos de correlação entre os parâmetros citados acima.

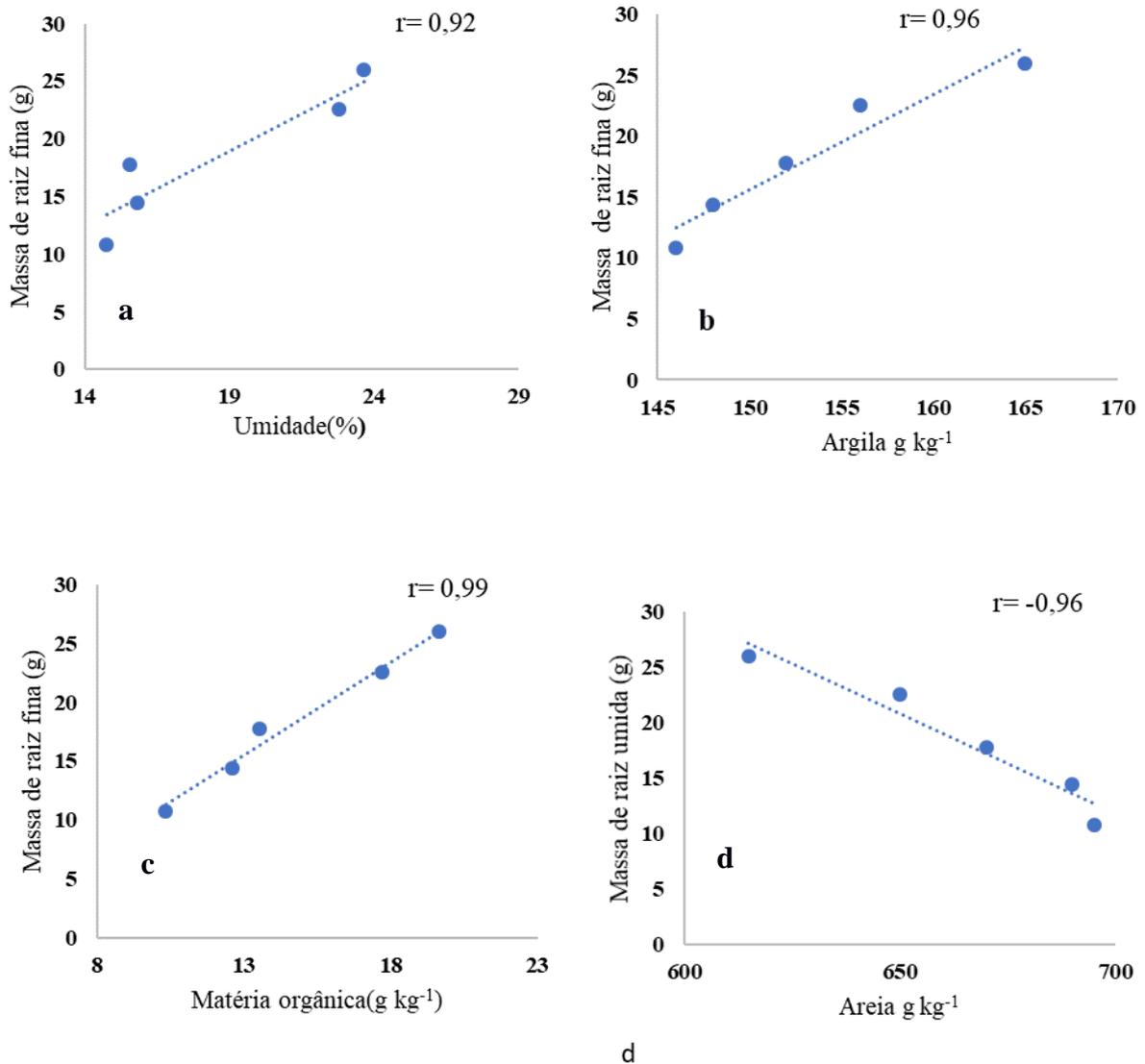


Figura 17-Relação de massa de raiz com os atributos do solo, umidade(a.) argila (b), matéria orgânica (c) e areia (d), em uma área de floresta com a presença de castanheira-da-amazônia na Resex Cajari.

Na figura acima, pode-se perceber:

- (i) uma forte correlação direta entre a umidade e a concentração de raiz fina da área de estudo ( $p < 0,001$ );
- (ii) forte correlação direta entre a massa de raiz fina e a argila (Figura 17 b) presente no local, ( $p = 0,006$ ), o que indica que quanto maior a concentração de argila maior será o acúmulo de raiz finas na área;
- (iii) forte correlação direta ( $p < 0,001$ ) entre concentração de raiz e matéria orgânica (Figura 17 c), inferindo que quanto maior o teor de matéria orgânica maior será a concentração de raiz fina;

(iv) forte correlação inversa ( $p < 0,001$ ) entre concentração de raiz fina e areia (Figura 17 **d**), demonstrando que quanto mais areia presente no solo menor será a massa de raízes.

Assim, é passível de interpretação que raízes finas buscam-se concentrar em áreas onde a taxa de umidade tende a ser mais expressiva. como áreas mais argilosas e teor de matéria orgânica maior. Dessa forma, as raízes evitariam concentrar-se em áreas com características mais arenosas, possivelmente devido a menor capacidade de retenção de nutrientes e água nesses solos com menos argila e matéria orgânica (WITSCHORECK et al., 2003). Também já é conhecida da ciência do solo a relação positiva entre argila e matéria orgânica, visto que os colóides de argila podem interagir com os colóides orgânicos, protegendo-os fisicamente da decomposição (SCHROEDER, 1984).

Além disso, a disponibilidade de água no solo é um fator importante no controle da produção de raízes finas em florestas tropicais. Sob baixa disponibilidade de água no solo, a produção de raízes finas é reduzida (YAVITT e WRIGHT, 2001).

#### **4. CONCLUSÃO**

O método eletrorresistividade com técnica de caminhamento elétrico é eficiente para identificar áreas de baixa resistividade em solos florestais. Essa baixa resistividade pode estar relacionada com maiores quantidades de raiz fina, umidade, matéria orgânica e argila.

A concentração de raízes finas em camadas sub superficiais de solo de baixa resistividade sob floresta com castanheiras, pode ser favorecida pelos maiores teores de argila e matéria orgânica. Essas interações positivas são potencializadas pela maior umidade do solo, no período de inverno amazônico, que favorece o processo de absorção de nutrientes. A partir dessa premissa, é possível gerar a seguinte hipótese para futuros trabalhos: a maior quantidade de raízes finas, argila e matéria orgânica, cria condições favoráveis para aumentar a condutividade iônica na rizosfera e para desenvolvimento de comunidade microbiana específica, gerando uma solução eletrolítica que contribui para a passagem de corrente elétrica e para diminuição da resistividade.

## REFERÊNCIAS

- AL HAGREY, S.A. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. **J. Exp. Bot.** 58:839–854. doi:10.1093/jxb/erl237, 200.
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G., 2013. Köppen climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* 22, 711–728. Baddeley, A., Turner, R., 2005. Spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. *J. Stat. Softw.* 12 (6), 1–42.
- AMATO M, BASSO B, CELANO G, BITELLA G, MORELLI G, ROSSI R (2008) In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. **Tree Physiol** 28:1441–1448.
- AMATO, M., ROSSI, R., BITELLA, G., AND LOVELLI, S.: Multielectrode Geoelectrical Tomography for the Quantification of Plant Roots, *Ital. J. Agron. /Riv. Agron.*, 3, 257–263, 2010.
- ANDRADE, A. G. Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas. Rio de Janeiro, 1997. 166p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1997.
- ATKINSON, D. The growth, activity and distribution of the fruit tree root system. **Plant and Soil**, v. 71, p. 23-35, 1983.
- AZEVEDO GB. Amostragem e modelagem da biomassa de raízes em um cerrado sensu stricto no Distrito Federal [dissertação]. Brasília: Universidade de Brasília; 2014.
- BESSON, A., COUSIN, I., SAMOUËLIAN, A., BOIZARD, H., & RICHARD, G. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. **Soil and Tillage Research**, 79(2), 239-249, 2004.
- DAHLIN, T.; BERNSTONE, C.; LOKE, M. H. A 3-D resistivity of a contaminated site at Lernacken, Sweden. **Geophysics**, v.67, n.6, p.1692-1700, 2002.
- DEMATTE, J. L. I. Characteristics of Brazilian soils related to root growth. In: *The soil root system in relation to Brazilian Agriculture*, Londrina, Paraná, 1981, 372 p.
- EMBRAPA. Manual de laboratório: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Paulo: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 313 p.
- FERREIRA, F.J.F. Técnicas e Aplicações de Imageamentos Elétricos 2-D e 3-D, 2002.
- FERREIRA, L. V.; ALMEIDA, S. S.; AMARAL, D. D.; PAROLIN, P. Riqueza e composição de espécies da floresta de igapó e várzea da Estação Científica Ferreira Penna: subsídios para o plano de manejo da Floresta Nacional de Caxiuanã. *Pesquisas, Botânica*, n. 56, p. 103- 116, 2005.

- FERREIRA, M. J. et al. Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de Castanheira-daamazônia em área degradada e submetidas à adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 393-401, abr./jun. 2012.
- GALLAS, J. D. F. Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. 2000. 174p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- GANDOLFO, O. C. B. & GALLAS, J. D. F. Eletroresistividade 3D - uma avaliação preliminar da técnica. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.23, n.2, p.191-198, 2005.
- GOWTHAM.R; SUNDAR.K.U.S. Generating Current From Plants Plant-e Technology v.3, 2015.
- KLUCZKOVSKI AM, MARTINS M, MUNDIM SM, SIMÕES RH, NASCIMENTO KS, MARINHO HA ET AL. Properties of Brazil nuts: a review. **African Journal of Biotechnology** 2015; 14(8): 642-648. <http://dx.doi.org/10.5897/AJB2014.14184>.
- LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- LOKE, M. H., R. D. BARKER. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-newton method, **Geophy. Prospect.**, 44, 131 – 152, 1996.
- LOKE, M. H. Resdinv rapid 2d resistivity and ip inversion using least-squares methods. User manual. Austin Tex., Advanced Geosciences, Inc., 66 p., 1998.
- LOKE, M. H., ACWORTH, I., DAHLIN, T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. **Exploration Geophysics**, 34, p.182-187. 2003.
- LOKE, M.H., 2013. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com)
- MELO, S.L.M.; GONÇALVES, J.L.M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, v.32, n.1, p.1-111, 2008.
- MORI, S. A.; PRANCE, G. T. Taxonomy, ecology, and economic botany of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.: Lecythidaceae). *Advances in Economic Botany, New York*, v. 8, p. 130-150, 1990.
- NASCIMENTO E.T.E. PIRES A.C.B. MORACS R A.V. 2003. Variação sazonal da resistividade em latossolos. 11/:SIIG f. Congr. Intern. Soc. Bras. de Geofísica. 8, Rio de Janeiro, Anais. C D-RO M.
- NASCIMENTO CTC, PIRES ACB e MORAES RAV de 2004. Reconhecimento de solos por meio de resistividade elétrica e radiação gama. **Revista Brasileira de Geociências**, 34(3): 383-392.
- NOEL, M & XU, B. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107, p.95-102, 1991.

- OLSSON PA, THINGSTRUP I, JAKOBSEN I, BAATH E. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology & Biochemistry* 1999; 31(13): 1879-1887.
- PRITCHETT, W. L. *Properties and Management of Forest Soils*. **New York**: John Wiley and Sons, 1979, 500 p.
- RAYMAN MP. The argument for increasing selenium intake. *Proceedings of the Nutrition Society* 2002; 61(2): 203-215.
- REYNOLDS, J. M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. **2<sup>a</sup> ed. UK**: Wiley-Blackwell, 2011.
- SANTOS, R.D., CURI, N., SHIMIZU, S.H., 2015. *Guia Prático para Classificação de Solos Brasileiros*, 1. ed. Produção independente - Publicado pelos Autores, Lavras, pp. 82p. Scoles, R., Gribel, R., 2011. Population structure of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*, Lecythidaceae) stands in two areas with different occupation histories in the Brazilian Amazon. *Hum. Ecol.* 39 (4), 455–464.
- SAINJU, U. M.; GOOD, R. E. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. ***Plant and Soil***, v. 150, p. 87-97, 1993.
- SCHROEDER, D. *Solos - Fatos e Conceitos*, 1984.
- SOBRINHO, T.R.G. *Estrutura, funcionamento e evolução das paisagens cobertas por savanas na reserva extrativista do Rio Cajari-AP, Amazônia oriental, Brasil*. Tese, PPG em Geografia – Tratamento da Informação Espacial, Pontifícia Universidade Católica de MG, Belo Horizonte, 2017, 315p.
- SNOWDON, P.; EAMUS, D.; GIBBONS, P.; KHANNA, P.; KEITH, H.; RAISON, J.; KIRSCHBAUM, M. Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies. Canberra: Australian Green-house Office, 2000.114p. (National carbon Accounting System Technical Report, 17).
- SOTO, M. A. *Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucessão em Ensaios com Solos Não Saturados*. Tese de Doutorado, Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP – São Paulo, 2004.
- SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. *Vegetatio*, Dordrecht, v. 75, n. 1-2, p. 81-86, may 1988.
- TICKTIN T. The ecological implications of harvesting non-timber Forest products. ***Journal of Applied Ecology*** 2004; 41(1): 11-21.
- THOMAS, E., C. A. CAICEDO, J. LOO, AND R. KINDT. 2014. The distribution of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) through time: from range contraction in glacial refugia, overhuman-mediated expansion, to anthropogenic climate change. ***Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*** 9: 267-291.
- VIANA VM, MELLO RA, MORAIS LM, MENDES NT. *Ecologia e manejo de populações de castanha-do-pará em reservas extrativistas Xapurí, Estado do Acre*. In: Gascon C,

MONTINHO P, editores. **Floresta Amazônica: dinâmica, regeneração e manejo**. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia; 1998.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* s.t. blake no município de Santa Maria-RS. **Árvore, Viçosa**, v. 27, n. 2, p. 177-183, mar./abr. 2003.

WUNDER S, ANGELSEN A, BELCHER B. Forests, livelihoods, and conservation: broadening the empirical base. **World Development** 2014; 64: S1-S11. worlddev.2014.03.007.

YAVITT, J.B. & WRIGHT, S.J. Drought and irrigation effects on fine root dynamics in a tropical moist forest, Panama. **Biotropica**, 33(3):421-434, 2001.

ZUIDEMA PA. Ecology and management of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*): PROMAB – Programa Manejo de Bosques de la Amazonia Boliviana. Riberalta: PROMAB; 2003. Scientific Series 6.