

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARBORIZAÇÃO
URBANA

MONOGRAFIA

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS GEOFÍSICOS E A TOMOGRAFIA
SÔNICA APLICADOS NA ANÁLISE DE TRONCOS E RAÍZES DE ÁRVORES**

VINICIUS RAFAEL NERIS DOS SANTOS

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PÓS-GRADUAÇÃO (LATO SENSU) EM ARBORIZAÇÃO URBANA

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS GEOFÍSICOS E A TOMOGRAFIA
SÔNICA APLICADOS NA ANÁLISE DE TRONCOS E RAÍZES DE ÁRVORES**

VINICIUS RAFAEL NERIS DOS SANTOS

Sob a Orientação do Professor

Bruno Araújo Furtado de Mendonça

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Arborização Urbana no Programa de Pós-Graduação em Arborização Urbana do Instituto de Florestas.

Seropédica, RJ
Outubro, 2022

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Nc

Neris dos Santos, Vinicius Rafael, 1982-
COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS GEOFÍSICOS E A TOMOGRAFIA
SÔNICA APLICADOS NA ANÁLISE DE TRONCOS E RAÍZES DE
ÁRVORES / Vinicius Rafael Neris dos Santos. - São
Paulo, 2022.
54 f.

Orientador: Bruno Araújo Furtado de Mendonça.
Monografia(Especialização). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Pós-graduação em Arborização
Urbana do Instituto de Florestas, 2022.

1. GPR. 2. Eletrorresistividade. 3. Tomografia
sônica. 4. Análise de árvores. I. Araújo Furtado de
Mendonça, Bruno , 1981-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós-graduação em
Arborização Urbana do Instituto de Florestas III.
Título.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA**



TERMO Nº 1087 / 2022 - DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)

Nº do Protocolo: 23083.064709/2022-80

Seropédica-RJ, 17 de outubro de 2022.

INSTITUTO DE FLORESTAS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARBORIZAÇÃO URBANA (*Lato sensu*)

Termo de aprovação da defesa de Monografia de VINICIUS RAFAEL NERIS DOS SANTOS

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Arborização Urbana, no Curso de Pós-Graduação em Arborização Urbana (*Lato sensu*) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

MONOGRAFIA APROVADA EM 14/10/2022

(Assinado digitalmente em 17/10/2022 18:56)
BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)
Matrícula: 2145654

(Assinado digitalmente em 18/10/2022 08:06)
JOAO VICENTE DE FIGUEIREDO LATORRACA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)
Matrícula: 1216943

(Assinado digitalmente em 01/11/2022 20:21)
DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 150.761.448-90

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **1087**, ano: **2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **17/10/2022** e o código de verificação: **3ac8b6718d**

RESUMO

SANTOS, V.R.N. **Comparação entre métodos geofísicos e a tomografia sônica aplicados na análise de troncos e raízes de árvores.** 2022. 54p. Monografia de conclusão de curso. Instituto de Floresta. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

A arborização urbana traz diversos benefícios, tanto estéticos como funcionais à população e ao meio ambiente. Porém, a falta de planejamento adequado com a escolha da espécie e as formas de manutenção e manejo, resultam na ocorrência de conflitos com a infraestrutura existente e transtornos sociais, como a queda de árvores, resultando em danos patrimoniais e até perda de vidas. Os critérios existentes para o diagnóstico da condição da sanidade limitam-se muitas vezes a avaliações visuais, sem informações sobre as condições internas de troncos ou da distribuição do sistema radicular no subsolo. O presente trabalho apresenta uma comparação das ferramentas disponíveis para tais análises, de troncos e raízes de árvores, através dos métodos geofísicos GPR (*Ground Penetrating Radar*) e eletrorresistividade (ER) e com o tomógrafo de impulso mecânico e resistógrafo. Foram analisados seis troncos árvores, localizados no Campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), entre as espécies de eucalipto (*Eucalyptus sp.*) e de munguba (*Pachira aquática Aubl.*). Nestas árvores foram realizadas as aquisições de dados com o tomógrafo de impulso mecânico, resistógrafo, GPR (antena de 1600 MHz) e eletrorresistividade. Já para a avaliação das raízes, foram selecionadas no Campus da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) três árvores, sendo duas seringueiras (*Havea brasiliensis L.*) e um abricó de macaco (*Couropita guianensis Aubl.*), onde foram adquiridos os dados com o tomógrafo de impulso mecânico e GPR (antena de 900 MHz). Pelos resultados obtidos nos troncos foi possível estabelecer poucas relações entre as metodologias utilizadas e suas respectivas propriedades físicas, tanto para uma análise qualitativa (visual da imagem gerada), quanto para quantitativa com a interpretação dos valores obtidos, pois mostram diferentes características da madeira estudada. Para as raízes, foi possível determinar uma região de ocorrência com o tomógrafo, obtendo as velocidades de propagação da onda mecânica e inferindo sua qualidade. Por outro lado, o método GPR é mais adequado para a discretização destas estruturas, através da profundidade de ocorrência e diâmetro.

Palavras-chave: GPR, eletrorresistividade, tomografia sônica, resistógrafo, avaliação não destrutiva.

ABSTRACT

SANTOS, V.R.N. **Comparison of geophysical methods and sonic tomography applied to tree trunks and roots analysis**. 2022. 54p. Course conclusion monograph. Instituto de Floresta. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Urban afforestation brings several benefits, both aesthetic and functional to the population and the environment. However, the lack of adequate planning, from the species choice to the forms of maintenance and management, results in the occurrence of conflicts with the existing infrastructure and recurrent social disorders, including accidents resulting from the tree fall, often resulting in property damage and until the life injuries. The existing criteria for diagnosing of the health condition or risk of falling trees are often limited to visual assessment, lacking information about the internal conditions of trunks or the distribution of the root system or soil. The present work presents a comparison of the tools available for such analysis, of trunks and tree roots, through the geophysical methods GPR (Ground Penetrating Radar) and the electroresistivity (ER) and with the tomograph of mechanical impulse and resistograph. The GPR method uses the principle of electromagnetic waves reflection at high frequency, making it possible to obtain a high-resolution image of the interior of the trunk and root system. On the other hand, the most commonly used methods in this type of evaluation, the impulse tomograph uses the propagation of sound in the wood to determine speed variations, which can indicate internal decay in trunks or the root health and the resistograph, which is the only direct method, and measures the penetration resistance of a drill inside the trunk. With the methods it is possible to indicate cavities and other internal problems in the trunk, as well as to show the presence of roots in the subsoil, however, like any indirect methodology, it has its limitations. The results were compared, showing their advantages and disadvantages for a better diagnosis and management of urban trees.

Keywords: GPR, electroresistivity, sonic tomography, resistograph, non-destructive evaluation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Método GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>).....	9
2.2 Método da eletrorresistividade (<i>ER</i>).....	10
2.3 Tomografia sônica.....	12
2.4 Propriedades elétricas da madeira.....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1 Testes controlados.....	14
3.2 Aquisição de dados em troncos.....	15
3.3 Aquisição de dados em raízes.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1 Troncos.....	22
4.2 Raízes.....	43
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXO A.....	53

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

No Brasil, especialmente nas grandes cidades, é comum a expansão urbana ocorrer de forma desordenada, com pouco ou nenhum planejamento (Grostein et al., 2001). Neste contexto, a implantação e/ou monitoramento de áreas verdes urbanas são prioridades, em que as árvores em ambiente urbano possam garantir a manutenção de suas funcionalidades (Grote et al., 2016; Rahman et al., 2018). Assim, o desenvolvimento e aplicações de novas tecnologias que visam a manutenção e o manejo da arborização urbana são de extrema importância para prevenir acidentes decorrentes de quedas, muitas vezes resultando em danos sociais, patrimoniais e até perda de vidas.

É bem conhecido o fato de que a arborização urbana traz diversos benefícios para o ambiente e para a saúde humana: elevação da permeabilidade do solo; controle de temperatura e umidade do ar; diminuição da poluição sonora e atmosférica; bem-estar psicológico e habitat para os pássaros e outras espécies da fauna (Vogt *et al.* 2017). Porém, devido ao planejamento falho, a escolha da espécie a ser plantada em vias públicas é feita por vezes de forma equivocada, resultando na ocorrência de conflitos com a infraestrutura já existente (Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente, 2015; Cunha et al. 2020).

Como as árvores são corpos biológicos vivos e com diferentes tecidos constituintes, são também suscetíveis à ocorrência de feridas em suas estruturas, que no tronco representam o início do processo de biodeterioração por organismos xilófagos, principalmente fungos apodrecedores (Brazolin, 2009). No meio urbano, os agentes xilófagos estão fortemente relacionados à queda de árvores, pois geralmente não é realizado um tratamento preventivo para este problema (Amaral, 2002; Brazolin, 2009). Adicionalmente, as árvores também são diretamente afetadas pelas condições do seu entorno, como a composição e compactação do solo (pobre e impermeável), dificultando seu enraizamento, bem como o corte inadequado de raízes de sustentação para construção de calçadas ou instalação de cabos e tubulações (Santos & Teixeira, 2001; Quigley, 2004).

Diante do exposto, a avaliação da estabilidade de árvores é uma ferramenta indispensável na preservação da integridade de pessoas e propriedades no contexto urbanístico das cidades (Santos & Teixeira, 2001). Para tanto, é necessário o conhecimento das espécies estudadas, suas propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como a maneira como se relacionam com o ambiente no qual estão inseridas e com os métodos de investigação disponíveis.

Atualmente existem diversos métodos utilizados na avaliação de árvores, dentre eles os tomógrafos de impulso mecânico em tronco ou raízes (Guardia, 2020; Dudkiewicz & Durlak, 2021) e resistência elétrica (Divaskara & Chaithra, 2022), *pulling test* ou “puxômetro” (Todo et al., 2022), penetrógrafo, resistógrafo ou trado de incremento (Papandrea et al., 2022; Kantavichai & Turnblom, 2022). Estes métodos diferem entre si pelas propriedades físicas avaliadas, tempo de execução, resolução dos resultados, custo e grau de invasão. No Brasil, as tecnologias de tomógrafo de impulso e resistógrafo se tornaram referência na tomada de decisão para manejo de árvores em florestas urbanas, sendo realizadas, em sua maioria, em troncos (Emerick, 2021).

Trabalhos recentes foram publicados utilizando metodologias alternativas às hoje aplicadas, como Apaydın et al. (2022), que aplicaram o GPR para melhorar o imageamento interno de troncos de árvores através de simulações numéricas e experimentos controlados em laboratório, e Luo et al. (2022), utilizaram um novo tipo de processamento para retirar ruídos causados pela irregularidade do terreno no mapeamento de raízes de árvores. O uso da eletrorresistividade em estudos florestais ainda é incipiente, sendo mais aplicado em trabalhos para o mapeamento de raízes no solo (Ehosioko et al., 2020; Balwant et al., 2022). Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo também avaliar a aplicabilidade dos métodos geofísicos *Ground Penetrating Radar* – GPR e da eletrorresistividade (ER), na avaliação da estrutura interna de troncos e do sistema radicular não aparente de árvores.

No presente trabalho esperou-se determinar diferenças de amplitudes de reflexão do GPR e de valores de resistividade elétrica entre as espécies analisadas, bem como para as lesões internas dos troncos, correlacionando-as com os resultados da tomografia de impulso mecânico (velocidade de propagação) e resistografia (resistência a penetração da broca). Já para as raízes, com a utilização do tomógrafo e do GPR, tentou-se correlacionar espacialmente os mapeamentos, com a indicação de sanidade das possíveis raízes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Método GPR (*Ground Penetrating Radar*)

O método eletromagnético *Ground Penetrating Radar* (GPR) utiliza ondas de rádio em frequências muito altas (entre 10 MHz a 2600 MHz), sendo originalmente empregado para identificar estruturas e feições geológicas rasas em subsuperfície ou localizar objetos enterrados, como tubulações ou cabos elétricos (Solla et al., 2022; Hu et al., 2022). O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR é semelhante à técnica de reflexão sísmica e a técnica de sonar, com exceção de que este é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas (EM).

Essa tecnologia consiste na transmissão de ondas EM repetidamente radiadas para o meio por uma antena transmissora colocada na superfície. A propagação do sinal EM depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no solo (Daniels, 2007); quanto maior o conteúdo de água, maior será a atenuação do sinal da onda EM e vice-versa. As mudanças das propriedades elétricas em subsuperfície faz com que parte do sinal seja refletido e as ondas refletidas e difratadas são recebidas pela antena receptora, também colocada na superfície. A energia refletida é registrada em função do tempo de atraso (tempo duplo de reflexão).

Tanto a condutividade elétrica (σ) quanto a permissividade dielétrica (ϵ) são importantes, pois afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar, respectivamente (Annan, 1996). Em geral, a condutividade é dominante para ondas EM de baixas frequências (< 1 MHz), enquanto para as altas do GPR (≥ 1 MHz), a

permissividade dielétrica é dominante (Ward & Hohmann, 1987). Normalmente, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

onde ε = permissividade dielétrica do material (F/m) e ε_0 = permissividade dielétrica no vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m).

Os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM num determinado meio são a atenuação (α) e a velocidade (v):

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (3)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8$ m/s).

Em estudos com GPR, normalmente supõe-se que as ondas EM se propagam com uma incidência normal às interfaces das camadas (Annan, 1992). Estas camadas possuem diferentes propriedades elétricas que podem causar uma forte impedância nas interfaces, determinando assim a quantidade do sinal que deverá ser refletida, expressa pelo coeficiente de reflexão em função dos ε em um modelo de duas camadas 1 e 2 (Ward & Hohmann, 1987):

$$r_{GPR} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}} \quad (4)$$

2.2 Método da eletrorresistividade (ER)

Os métodos geoeletricos têm como objetivo determinar a distribuição de alguns parâmetros físicos elétricos em subsuperfície através de medições em superfície. O método da eletrorresistividade utiliza a resistividade elétrica aparente para caracterizar um material ou meio geológico, grandeza que está relacionada aos mecanismos de propagação de correntes elétricas nos mesmos. Basicamente, a resistividade elétrica quantifica a resistência que um determinado material oferece à passagem de correntes elétricas, bem como seu parâmetro inverso, a condutividade, quantifica a facilidade que um material possui para transmitir corrente em seu interior, isto é, permitir sua passagem. De acordo com Telford et al. (1990), se considerarmos um corpo cilíndrico feito de material homogêneo e condutor, de comprimento L e seção transversal S , podemos definir sua resistividade (ρ) teórica como:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} \quad (5)$$

com R sendo a resistência elétrica (Ohm). Quando atravessado por uma corrente elétrica (I), o cilindro será submetido a uma diferença de potencial elétrico (ΔV) e sua resistência será (Lei de Ohm):

$$R = \frac{\Delta V}{I} \rightarrow \rho = \frac{\Delta V S}{I L} \quad (6)$$

Ao contrário da resistência (R), a resistividade e condutividade são grandezas bastante específicas dos materiais, dependendo de características microscópicas intrínsecas dos mesmos, o que as tornam boas ferramentas para o diagnóstico de um meio. Os mecanismos mais comuns de propagação de corrente elétrica são as condutividades eletrônica e eletrolítica. A condutividade eletrônica é devida à presença de materiais condutores, já a eletrolítica é a mais comum e ocorre por conta do deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros, fissuras e fraturas. Por ocorrer preferencialmente nos fluidos intersticiais e nas superfícies dos grãos dos solos e rochas, por exemplo, esse tipo de condução sofre grande influência da porosidade, composição do material, teor de água e dos sais dissolvidos (Keller, 1987).

Dentre esses fatores, os teores de água e de sais dissolvidos são os mais importantes, sendo que a elevação dos mesmos é inversamente proporcional à resistividade. Esta propriedade física pode apresentar, portanto, uma grande variação de valores, o que incrementa sua aplicabilidade em estudos de diferentes naturezas, como hidrogeológicos, ambientais e na aplicação sugerida neste trabalho, na detecção de cavidades e podridão de troncos de árvores.

O método da eletrorresistividade é aplicado introduzindo uma corrente elétrica artificial no meio (tronco), através de dois eletrodos (convencionalmente chamados de eletrodos de corrente, "A" e "B") e mede-se o potencial gerado em outros dois eletrodos localizados nas proximidades do fluxo de corrente (eletrodos de potencial, "M" e "N"), o que permitirá calcular a resistividade real ou aparente do meio (Orellana, 1972; Telford et al., 1990; Reynolds, 1997). A resistividade elétrica (em Ohm.m ou Ωm) depende da corrente injetada, da diferença de potencial medida entre MN e da geometria do arranjo de eletrodos no meio, denominado de fator geométrico (K):

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I} K \quad (7)$$

O arranjo escolhido para as medidas em troncos foi o dipolo-dipolo, onde o espaçamento a entre o par de eletrodos de corrente (AB) é o mesmo entre do par de eletrodos de potencial (MN) e a distância entre estes dois pares é um fator na . Depois de realizada a primeira medida, um par de eletrodos é deslocado adiante a uma distância na , aumentando-se, desta maneira, a profundidade de investigação. O fator geométrico para o arranjo dipolo-dipolo é dado por:

$$K = \pi n(n + 1)(n + 2)a \quad (8)$$

Esse arranjo apresenta uma boa sensibilidade em mudanças horizontais de resistividade e de fácil aquisição em campo. Uma desvantagem deste arranjo é a perda de sinal recebido com o aumento do fator n , ou seja, quanto mais afastados estiverem os pares de eletrodos, menor será o sinal que poderá ser lido (Loke, 1999).

2.3 Tomografia sônica

A tomografia sônica ou de impulsos mecânicos é baseada na medida dos tempos de viagem das ondas mecânicas (Rinntech, 2012). As velocidades de impulso dentro da madeira são altamente correlacionadas com a densidade do material e, portanto, podem ser usadas para coletar informações sobre sua qualidade. A madeira densa e saudável transmite melhor as ondas de tensão do que a madeira danificada por algum tipo de deterioração ou rachaduras.

Cada sensor é equipado com um medidor de vibração capaz de realizar uma análise direta do tempo real dos impulsos de entrada. Ao produzir uma vibração nos sensores, com uma batida de martelo por exemplo, gera as ondas de estresse que viajam pela madeira. O tempo que as ondas de estresse viajam entre os sensores é registrado e convertido em velocidades. Segundo Smulski (1991), a velocidade de propagação (v) da onda mecânica é diretamente proporcional à raiz quadrada do módulo elástico (E) da madeira e inversamente proporcional à raiz quadrada de sua densidade (d):

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (9)$$

Ou seja, a velocidade de propagação das ondas mecânicas será maior em madeiras de maior densidade, uma vez que o fator predominante é o módulo elástico, que é a propriedade física que pode alterar com o decaimento da madeira (Deflorio et al., 2007).

2.4. Propriedades elétricas da madeira

A madeira viva, ou lenho, é um material biológico complexo cujas propriedades físicas podem variar, não apenas entre diferentes espécies, mas também dentro de um mesmo tipo, em função da diversidade e também em resposta às diferentes condições ambientais do meio onde estejam localizados. Com a utilização do GPR e eletrorresistividade é preciso um entendimento maior das propriedades elétricas na madeira viva, uma vez que tais métodos utilizam a propagação de ondas eletromagnéticas (permissividade dielétrica) e corrente elétrica (resistividade elétrica), respectivamente, no interior do tronco. Dentre as características com maior importância e influência no que diz respeito às propriedades elétricas do lenho, destacam-se a adsorção de fluidos do ambiente (por ser um material higroscópico) e sua estrutura anisotrópica, ou seja, suas propriedades físicas podem variar quando analisadas em diferentes direções e está diretamente relacionada, principalmente, à resistividade elétrica (Vermaas, 1975).

O trabalho de Vermaas (1975), utilizando corrente direta, demonstrou alguns fatores que influenciam a resistência elétrica e, por consequência, a resistividade elétrica do lenho. Entre eles estão variáveis relacionadas diretamente as características físicas da madeira, tais como: conteúdo e distribuição de fluido/água no lenho, concentração de íons (sais), direção dos veios/fibras, lignina e densidade. Além destes fatores, há também as variáveis experimentais, como o tipo de eletrodos com os quais é injetada a corrente elétrica, resistência de contato dos mesmos e a temperatura e umidade do ambiente.

Todas essas características influenciam diretamente a resistividade elétrica medida na árvore, porém, o principal fator relacionado a mudanças bruscas das propriedades elétricas é a quantidade de água presente no lenho, pois a madeira seca é um isolante elétrico com resistividade de $3 \times 10^{17} \Omega\text{m}$, enquanto uma madeira a 50% ou mais de umidade (quantidade de água) tem resistividade na casa de $10^2 \Omega\text{m}$. Langwig & Skaar (1975) encontraram uma relação exponencial entre a resistividade e quantidade de água, através da regressão dos dados obtidos.

A água em árvores concentra-se predominantemente no alburno ocorrendo em duas formas diferentes: a água presa, ligada com a parede celular através de forças interativas; e a água livre, que flui pelas cavidades das células, transportando os sais pela árvore, sem forças interativas com a parede celular. Stewart (1964) forneceu intervalos de quantidade de água nos grupos angiospermas (entre 35% e 60%) e gimnospermas (entre 75% e 100%). Os veios e fibras também exercem influência na resistividade elétrica do lenho, pois a condutividade na direção das fibras pode ser de 2,3 à 4,5 vezes maior nas gimnospermas e, de 2,5 à 8,0 vezes maior nas angiospermas. Venkateswaran (1972 e 1973) menciona ainda o aumento na densidade da madeira através de compressão, bem como o aumento da lignina no lenho como fatores que reduzem a resistividade do material.

O modelo criado por Langwig e Skaar (1975) permite obter-se a quantidade média de água presente na árvore a partir do cálculo da resistividade:

$$\log(r) = A - B \log(M) \quad (10)$$

onde M é a quantidade de água nas fibras (em porcentagem), A e B são parâmetros que variam de acordo com a região, porém, independente da espécie. Os autores calcularam estes parâmetros para árvores localizadas na Venezuela, onde $A = 17,248$ e $B = 8,979$.

De acordo com Vielledent *et al.* (2018), o valor de M é dado no ponto de saturação das fibras para todas as espécies de árvores vivas, que é de aproximadamente 30%. Assim, a comparação dos valores de M com a quantidade de água saturada é dada pela equação de Stewart (1964):

$$M_s = 100 \times \left(\frac{1}{D_b} - 0,65 \right) \% \quad (11)$$

onde M_s é a quantidade de água na árvore caso ela esteja totalmente saturada, supondo a densidade dos constituintes da árvore (fora a água) ser de $1,54 \text{ g/cm}^3$. E D_b é a densidade básica da espécie analisada, obtida a partir da base de dados do *ICRAF's Tree Functional and Ecological Databases – World Agroforestry*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Testes controlados

Inicialmente foram realizados experimentos para se determinar as melhores formas para aquisição de dados geofísicos em troncos, tanto com a utilização do GPR quanto para eletrorresistividade, bem como uma avaliação preliminar do programa de leitura dos dados. Foi utilizado um tubo de PVC com 2 m de altura e 20 cm de diâmetro, preenchido com areia levemente umedecida de forma não homogênea (Figura 1). Tal esquema foi escolhido por ser um meio cilíndrico e a utilização da areia úmida tem como objetivo simular anomalias adicionais no interior do tubo, semelhante ao que pode ser encontrado no interior do tronco de uma árvore. No quadrante superior direito, foi inserido outro tubo de PVC, porém, vazio, com 2 m de altura e 5 cm de diâmetro, simulando uma cavidade (Figura 1a). Diversos modos de aquisição foram testados a fim de se obter a melhor relação entre a qualidade, resolução dos dados adquiridos e o tempo de aquisição. Para ambos os métodos se optou por perfis longitudinais, emulando a forma como são utilizados os equipamentos em sua concepção original e, desta forma, obtendo-se dados mais verossímeis com a realidade (Figura 1b e Figura 1c).

Para a aquisição de dados com o GPR, foi utilizada uma antena com frequência de 2600 MHz, já, para a ER, o arranjo escolhido foi o dipolo-dipolo, com espaçamento entre eletrodos de 10 cm. Para otimizar a tomada de dados foram definidos perfis a cada 45°, em todo o entorno do tubo resultando em oito perfis longitudinais, onde esse intervalo pode variar de acordo com o diâmetro da árvore (DAP) ou com o grau de resolução desejado para os resultados. Para a visualização dos resultados foi desenvolvido, em linguagem Python, um programa que processa, organiza e plota as seções em alturas determinadas pelo usuário. Os resultados dos experimentos podem ser vistos na Figura 2, para os dois métodos utilizados, em uma seção transversal do tubo de PVC na altura de 1 m.

Tanto para o GPR (Figura 2a), quanto para a eletrorresistividade (Figura 2b) foi possível detectar a posição da tubulação vazia (seta preta), sendo que para o primeiro método é mostrado com altos valores de amplitude de reflexão da onda EM (em azul), já para o segundo, com alta resistividade elétrica (aproximadamente 3600 Ω m, em vermelho), pois está preenchido de ar. Com o método elétrico também é possível identificar regiões com maior umidade (baixa resistividade elétrica, em azul mais escuro). Um ponto importante que deve ser considerado é que ambas as metodologias não fornecem a dimensão ou a geometria exata do alvo encontrado, sendo possível apenas localizar a região de maior influência da anomalia.

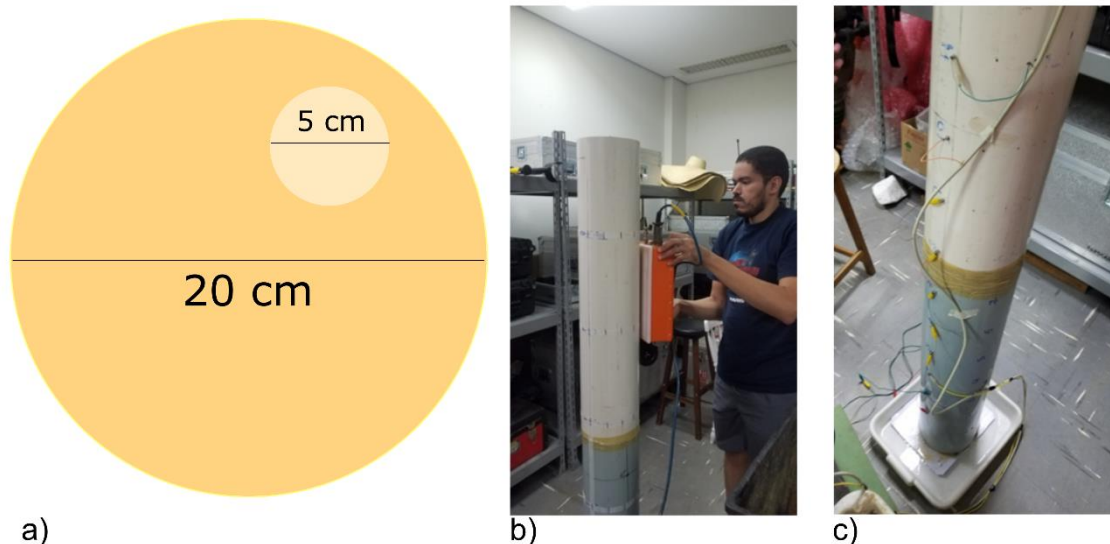


Figura 1: Experimento realizado com tubo de PVC. a) Dimensões dos tubos utilizados. b) Aquisição de dados GPR. c) Aquisição de dados de eletrorresistividade.

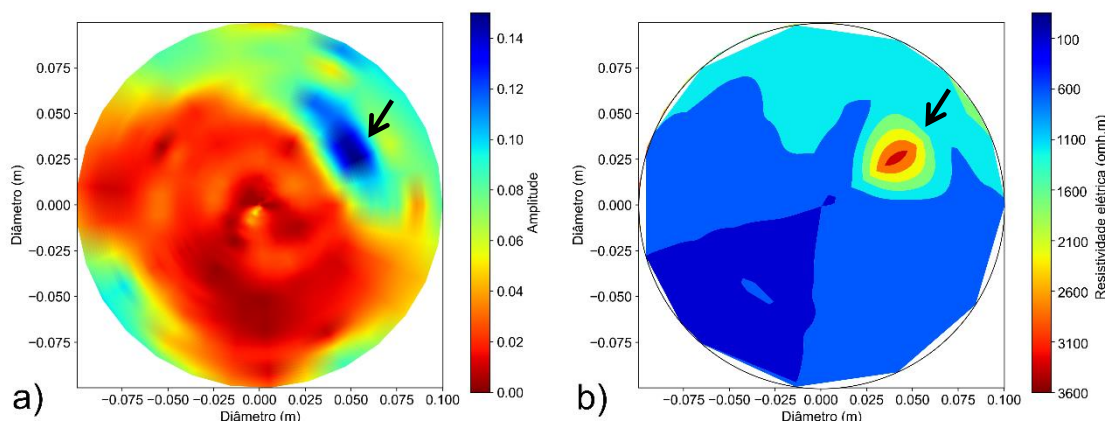


Figura 2: Resultados obtidos no tubo de PVC. a) Método GPR (antena de 2600 MHz). b) Método da eletrorresistividade. Seta preta: posição do tubo encontrado.

3.2 Aquisição de dados em troncos

Após a validação feita a partir dos experimentos no tubo de PVC, foram coletados dados em campo em seis árvores distintas, sendo elas eucaliptos e mungubas. As árvores estão localizadas no interior do Campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), na cidade de Seropédica, estado do Rio de Janeiro (Figura 3). O eucalipto (*Eucalyptus sp.*) é uma planta da família Myrtaceae, as quais são nativas da Oceania e incluem mais de 700 espécies diferentes. Apresenta valor comercial, uma vez que é utilizado para energia, celulose e papel e serraria. A característica mais importante para o presente estudo é a densidade básica, com valores variando entre 720 a 800 kg/m³ (Lobão et al., 2004; Alves et al., 2017). Já a munguba (*Pachira Aquatica Aubl.*) pertence à família Malvaceae ou Bombacaceae, tem origem na América Central e do Sul. Sua madeira é muito leve e esbranquiçada, com densidades variando entre 180 a 300 kg/m³ (Oliveira, 2018).

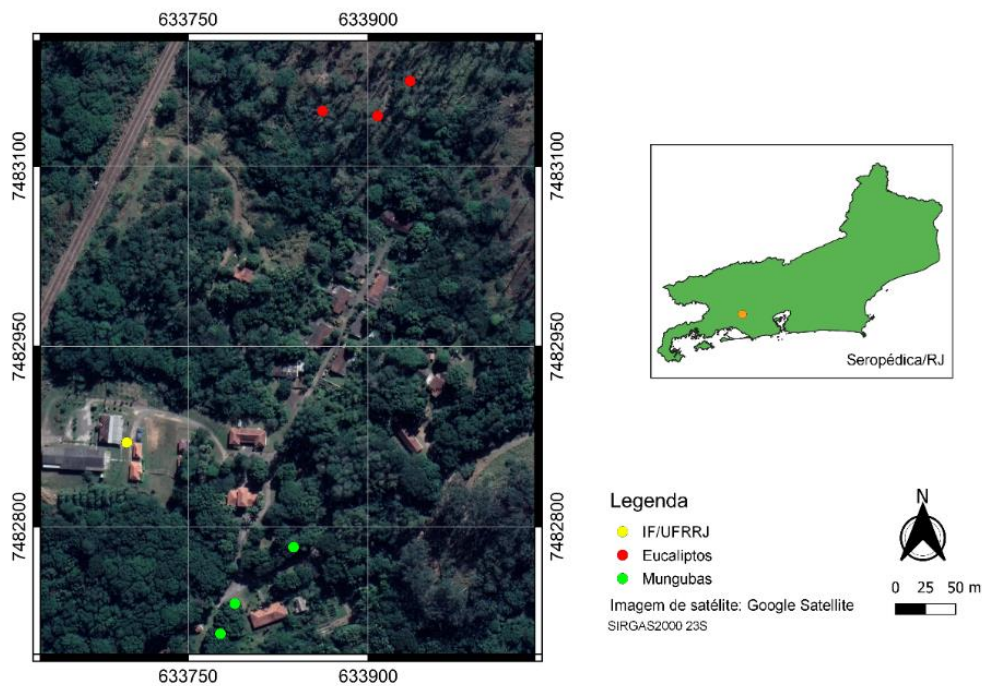


Figura 3: Localização dos exemplares de troncos analisados na UFRRJ, Seropédica/RJ.

A escolha por essas espécies de árvores se deu pela grande diferença de densidade da madeira, fator determinante para a propagação das ondas mecânicas e esperou-se relacionar as velocidades encontradas pelo tomógrafo com as amplitudes de reflexão do GPR e a resistividade elétrica do método da ER, além de confirmar alguma região anômala através do resistógrafo. Os eucaliptos selecionados, denominados de EU1, EU2 e EU3, com DAP de 0,80 m, 0,78 m e 0,67 m, respectivamente, são indivíduos antigos plantados na década de 70 no campus da UFRRJ, com a copa mais rala e apresentando brotações ao longo do tronco e dois deles (EU2 e EU3) possuem defeitos na base, pela ação de organismos xilófagos ou por queimadas ocorridas no local, bem como pela idade avançada do exemplar (Figura 4).



Figura 4: Defeitos encontrados na base dos eucaliptos EU2 (a) e EU3 (b).

As mungubas selecionadas, MG1, MG2 e MG3, com DAP de 0,76 m, 0,61 m e 0,67 m, respectivamente e de maneira geral apresentam um bom estado visual, com uma copa frondosa apesar de defeitos aparentes nos troncos em dois deles (MG2 e MG3). O exemplar MG2 possui uma cavidade desde a base até a altura de 1,50 m (Figura 5a), já MG3 evidencia uma região de podridão na base, com a presença de um formigueiro (Figura 5b).



Figura 5: Defeitos encontrados na base das mungubas MG2 (a) e MG3 (b).

Na aquisição de dados com o método GPR foi utilizada uma antena de 1600 MHz e controlador SIR4000, da fabricante americana GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*). Em cada árvore foram adquiridos oito perfis (a cada 45°), coincidentes com os perfis de eletrorresistividade e os sensores da tomografia sônica, partindo de uma altura de 1,80 m e indo até a base da mesma (Figura 6). Após a coleta, os dados são pré-processados no programa desenvolvido através da aplicação de ganhos e filtros de frequência, visando melhorar a visualização dos resultados e posteriormente são visualizados como seções na base e na altura do DAP (1,30 m) da árvore analisada, em função da amplitude de reflexão da onda EM.

Os dados de eletrorresistividade foram coletados com o equipamento Syscal Pro, da fabricante francesa *Iris Instruments*, com arranjo dipolo-dipolo, nove canais (dipolos) e espaçamento de eletrodos de 15 cm (Figura 7). Os perfis iniciaram na base e foram até uma altura de 1,80 m, nas mesmas posições que o GPR e tomógrafo. Os dados foram pré-processados no software Res2dInv (Loke, 1999) para a obtenção dos perfis de resistividade elétrica e então são organizados e visualizados no programa desenvolvido através de seções transversais na base e na altura do DAP, em função da distribuição de resistividade elétrica no interior do tronco.



Figura 6: Aquisição de dados utilizando o método GPR. a) Exemplar de munguba analisado. b) Detalhe da antena de 1600 MHz utilizada.



Figura 7: Aquisição de dados utilizando o método da eletrorresistividade. a) Exemplar de munguba analisado. b) Detalhe da disposição dos eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N) no tronco.

Para a coleta de dados com o tomógrafo de impulso mecânico, foi utilizado o equipamento Arbotom, da fabricante alemã Rinntech, com oito sensores dispostos a cada 45° na circunferência do tronco (Figura 8a e Figura 8b). Foram adquiridas seções de velocidades na base e na altura do DAP (1,30 m) da árvore. Para uma avaliação mais assertiva e diminuir ambiguidades do estado interno dos troncos de eucalipto e munguba analisados, utilizou-se o resistógrafo (método direto), que mede a resistência da madeira a penetração da broca (em porcentagem) em função da distância de entrada da mesma.

O resistógrafo utilizado foi da Rinntech, modelo 4452-S e broca de 1,5 mm de diâmetro (Figura 8c). Os locais de perfuração foram definidos a partir das imagens geradas pelo tomógrafo de impulso mecânico, onde foi observado algum tipo de variação na velocidade de propagação da onda. A partir dos gráficos do resistógrafo digitalizados, foi possível analisá-los em conjunto das outras propriedades físicas medidas, do GPR e eletrorresistividade, para estabelecer relações com o que foi medido e o real estado da madeira. A Tabela 1 mostra um resumo as espécies avaliadas, com localização e características.



Figura 8: Aquisição de dados utilizando tomógrafo sônico e resistógrafo. a) Exemplar de eucalipto analisado. b) Detalhe dos sensores dispostos no tronco. c) Aquisição de dados de resistografia em eucalipto.

Tabela 1: Informações dos indivíduos com troncos analisados. Siglas: TM: tomógrafo impulso mecânico; RT: resistógrafo; GPR: ground penetrating radar; ER: eletrorresistividade.

Indivíduos	Identificação	Coordenadas UTM 23K WGS84	DAP (m)	Métodos	Condições
Eucalipto	EU1	633908/7483142	0,80	TM/RT/GPR	Saudável
Eucalipto	EU2	633862/7483146	0,78	TM/RT/GPR/ER	Organismos xilófagos
Eucalipto	EU3	633935/7483171	0,67	TM/RT/GPR/ER	Queimadas
Munguba	MG1	633789/7482736	0,76	TM/RT/GPR/ER	Saudável
Munguba	MG2	633777/7482711	0,61	TM/RT/GPR	Cavidade
Munguba	MG3	633838/7482783	0,67	TM/RT/GPR	Formigueiro

3.3 Aquisição de dados em raízes

As árvores selecionadas para a comparação entre o tomógrafo de raízes e o GPR estão localizadas no interior do campus da ESALQ (Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz), na cidade de Piracicaba, estado de São Paulo (Figura 9). Foram escolhidas duas seringueiras (SG1 e SG2) e um abricó de macaco (AM). A *Hevea brasiliensis L.*, popularmente chamada de seringueira, pertence à família das Euphorbiaceae e é muito comum de ser encontrada na floresta amazônica, possui uma madeira leve e esbranquiçada, com densidade de 450 kg/m³ (Portal Embrapa) e possui valor econômico devido ao seu látex para a produção de borracha. Segundo Mendez (1990), 54% das raízes de uma seringueira se concentram a até 1,60 m do tronco e a uma profundidade máxima de até 0,30 m. Já o abricó de macaco (*Couroupita guianensis Aubl.*) é uma árvore

originária da Amazônia, pertence à família das Lecythidaceae, muito utilizada no paisagismo urbano e também possui uma madeira leve com densidade de 420 kg/m^3 (Portal Embrapa).

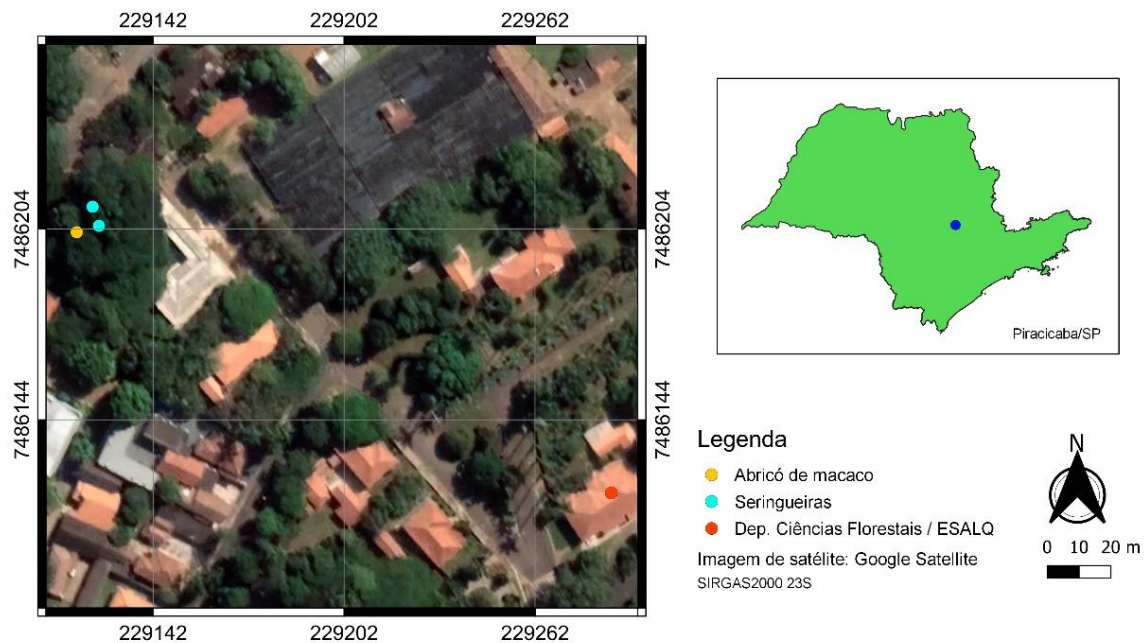


Figura 9: Localização dos exemplares de raízes analisados na ESALQ, Piracicaba/SP.

Na detecção das raízes foi utilizado o método GPR, com uma antena de 900 MHz e controlador SIR4000 (GSSI) e definiu-se uma malha de perfis paralelos em ambas as direções, X e Y, a partir do tronco, com dimensão de $4 \times 4 \text{ m}$ (Figura 10a). Foram adquiridos 109 perfis GPR em cada árvore, nas duas direções, e os dados adquiridos são organizados e interpolados matematicamente (método *basis spline*) construindo um conjunto 3D de informações, para análise das seções em profundidade, sendo possível determinar a distribuição espacial das raízes em subsuperfície. Mais detalhes sobre a metodologia desenvolvida de mapeamento do sistema radicular de árvores podem ser encontrados em Santos et al. (2022).

O ArboRadix, também da fabricante Rinntech, foi utilizado para a avaliação do sistema radicular dos exemplares selecionados. O equipamento é utilizado para a detecção das raízes e estima a área de cobertura das mesmas, sendo possível localizar regiões de lesões ou possível ataque de fungos (Rinntech, 2012). O funcionamento é similar ao tomógrafo de tronco, uma vez que são produzidas ondas mecânicas no solo, em locais distintos (R1, R2, R3, ...) ao redor da árvore, através de uma haste de metal (Figura 10b) e os sensores dispostos no entorno do tronco da árvore avaliada (Figura 10c) e são medidos os tempos de percurso dessas ondas. Caso o impulso mecânico não chegue a um dos sensores, possivelmente não existe raiz naquele local. Ainda, caso a velocidade for muito abaixo, comparada a outras raízes, também pode-se interpretar como algum tipo de dano àquela estrutura. Para a comparação com o método GPR, os dados foram adquiridos na mesma área previamente mapeada. A Tabela 2 mostra um resumo as espécies avaliadas, com localização e características.

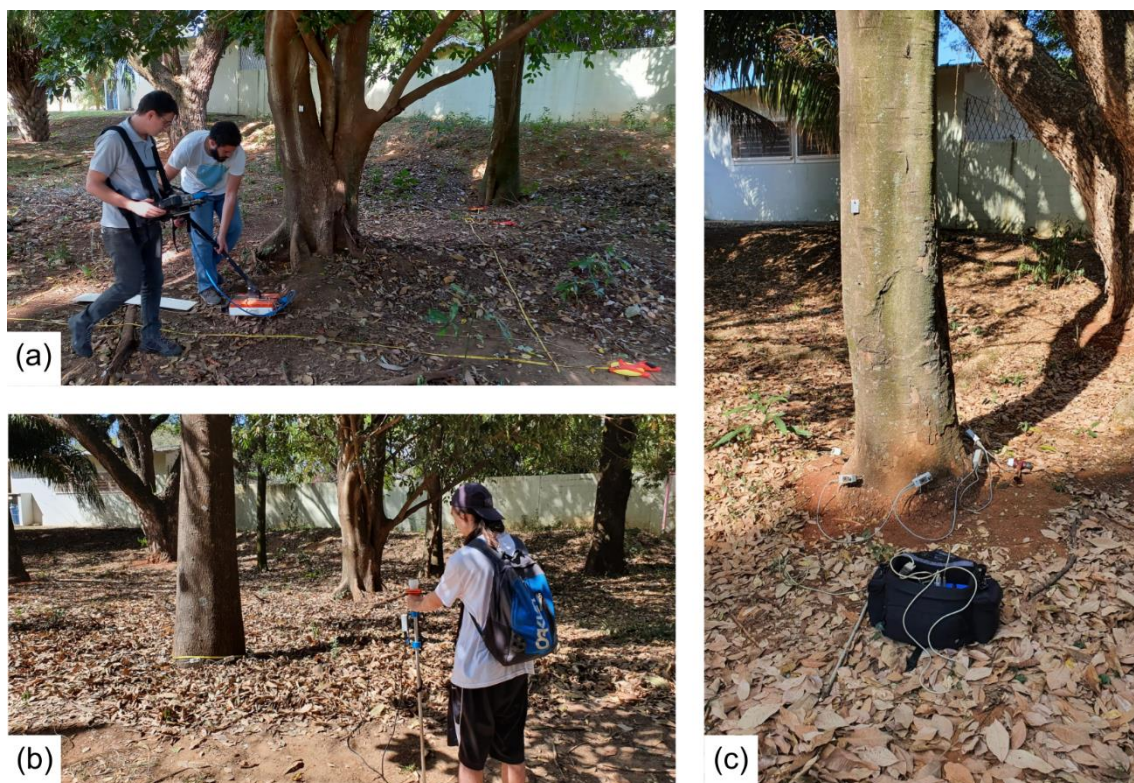


Figura 10: Aquisição de dados em raízes. a) Aquisição utilizando método GPR (antena de 900 MHz). b) Aquisição utilizando o tomógrafo de raízes (Arboradix). c) Sensores dispostos na base da árvore para aquisição de dados.

Tabela 2: Informações dos indivíduos com raízes analisados. Siglas: TM: tomógrafo impulso mecânico; GPR: ground penetrating radar.

Indivíduos	Identificação	Coordenadas UTM 23K WGS84	DAP (m)	Métodos	Condições
Abricó de macaco	AM	229118/7486203	0,52	TM/GPR	Saudável
Seringueira	SG1	229123/7486211	0,63	TM/GPR	Saudável
Seringueira	SG2	229125/ 7486205	0,48	TM/GPR	Saudável

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Troncos

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a avaliação de troncos com as metodologias empregadas. As seções de tomografia mostram a distribuição de velocidades (m/s) da onda mecânica em seu interior. Já o GPR, as amplitudes de reflexão da onda eletromagnética (adimensional). Por fim, a eletrorresistividade apresenta a resistividade elétrica (Ωm). As linhas tracejadas nas figuras indicam a posição onde foi realizada a resistografia e são mostradas em conjunto com as outras propriedades físicas.

A Figura 11 mostra as seções de tronco obtidas para o eucalipto EU1 que, visualmente, não apresenta nenhum defeito externo aparente, utilizando-se os métodos da tomografia sônica e GPR. Na base (Figura 13a), a velocidade de propagação da onda mecânica máxima encontrada foi de 2830 m/s, com algumas regiões, nas posições do

sensor 2 e entre 7-8, com velocidades de aproximadamente 1685 m/s. Segundo Lin et al. (2016), uma árvore de densidade mais elevada e saudável possui uma variação de velocidade da ordem de 1800 a 2600 m/s. Para o método GPR (Figura 11b), a amplitude de reflexão variou entre -0,13 e 0,20 aproximadamente, porém, na maioria da seção, o valor foi de -0,025, não apresentando nenhuma região anômala significativa. Na altura do DAP (1,30 m), a velocidade máxima alcançada foi de 1740 m/s, com uma extensa região anômala a partir da posição 2 que se estende até o sensor 6, com uma velocidade de 750 m/s, aproximadamente (Figura 11c). Já a amplitude de reflexão do georadar, nesta mesma altura, variou entre -0,15 a 0,15, aproximadamente, com valor médio de 0,02, com uma distribuição homogênea no interior do tronco (Figura 11d).

Os resultados da avaliação do tronco do eucalipto EU2 podem ser vistos na Figura 12. Na base a velocidade máxima encontrada foi de 1440 m/s, predominando uma região o lenho com o valor de 850 m/s (Figura 12a), já o GPR mostrou uma amplitude de reflexão menor, quando comparada com o eucalipto EU1, variando entre -0,05 e 0,05 aproximadamente, com uma região de baixa amplitude na posição 2 (Figura 12b). A resistividade elétrica variou de 200 a 1400 Ω m, predominando valores mais baixos nas regiões mais externas do tronco, onde se destacam duas anomalias de resistividade mais elevada, nas posições 5 (interna) e 7 (externa). Na altura do DAP, a tomografia mostrou uma região de baixa velocidade de propagação na posição 2, no valor de 1100 m/s, onde o valor máximo foi de 2470 m/s (Figura 12d). A amplitude de reflexão não apresentou variação em relação aos valores encontrados na base, com ocorrência de valores menores em todo o interior do tronco (Figura 12e). Os valores de resistividade elétrica (Figura 12f) apresentaram uma variação maior, entre 100 e 3500 Ω m, aproximadamente, coincidindo com as altas resistividades no cerne no tronco (Larsson et al., 2004).

A Figura 13 apresenta as seções de tronco obtidas para o eucalipto EU3 que também apresenta defeitos externos visíveis. Na base, a velocidade de propagação da onda mecânica máxima encontrada foi de 1480 m/s, onde é possível identificar uma região anômala de baixa velocidade (475 m/s) entre as posições 8-1 (Figura 13a). Para o método GPR (Figura 13b), a amplitude de reflexão variou entre -0,01 e 0,04 aproximadamente, com regiões de baixa amplitude entre as posições 8-1 e 3-4. A resistividade elétrica para a EU3 apresentou os menores valores entre os eucaliptos, variando de 50 a 750 Ω m, apresentando duas regiões de maior resistividade, nas posições 1 e entre 3-5 (Figura 13c). Na altura do DAP (1,30 m), a velocidade máxima alcançada foi de 1420 m/s, com uma região central de contraste, com uma velocidade de 610 m/s, aproximadamente (Figura 13d). Já a amplitude de reflexão do georadar, nesta mesma altura, variou entre -0,005 a 0,03, aproximadamente, obtendo os menores valores dentre os eucaliptos (Figura 13e). Já a resistividade elétrica variou entre 100 e 1750 Ω m, apresentando, na posição 6, uma região com altos valores (Figura 13f).

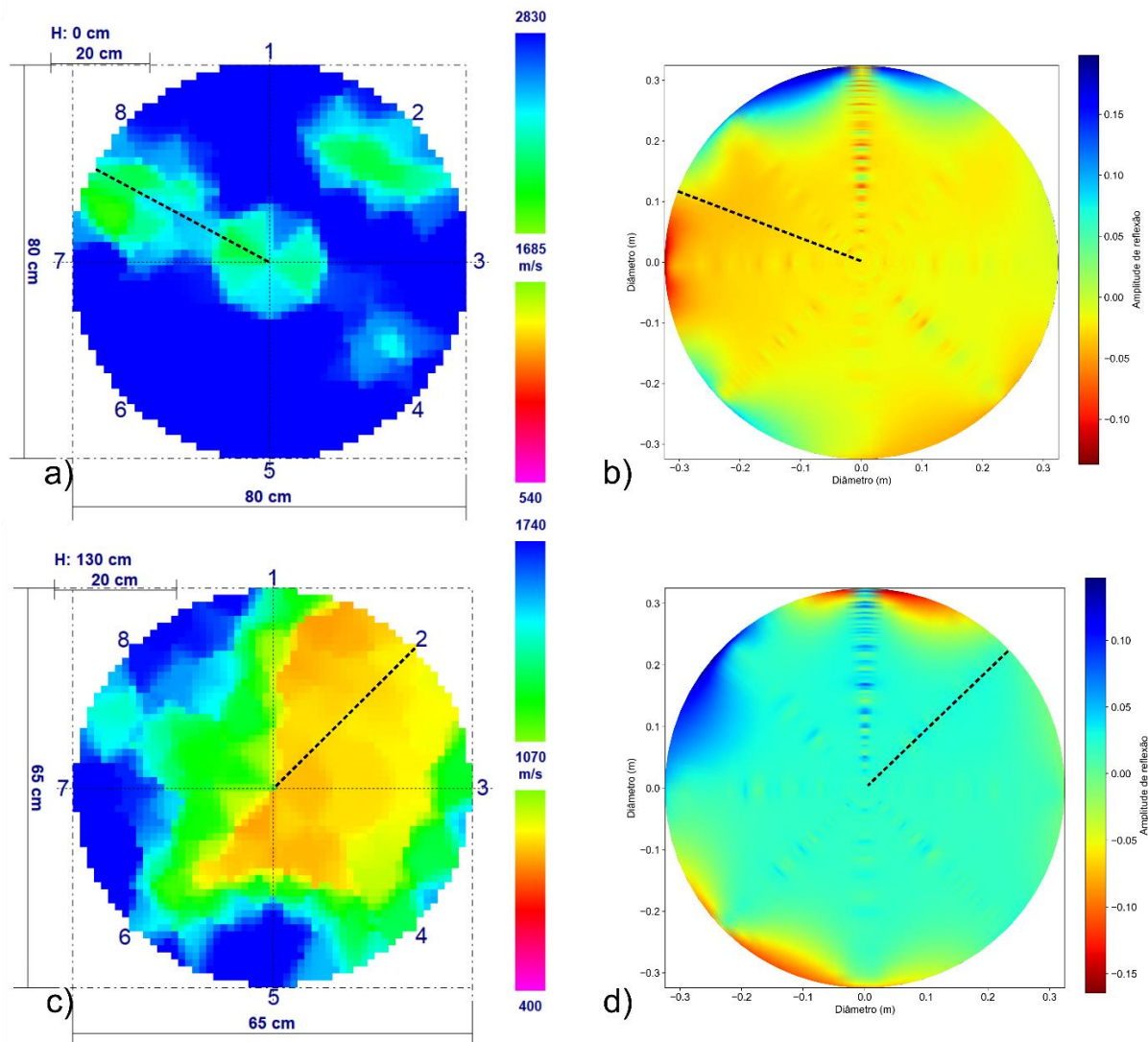


Figura 11: Resultados da análise de tronco do eucalipto EU1 (na base a 0,20 m de altura e no DAP a 1,30 m de altura) com tomografia sônica e GPR (linha tracejada preta: posição da aquisição de dados de resistografia). a) Tomografia sônica na base. b) GPR na base. c) Tomografia sônica no DAP. d) GPR no DAP.

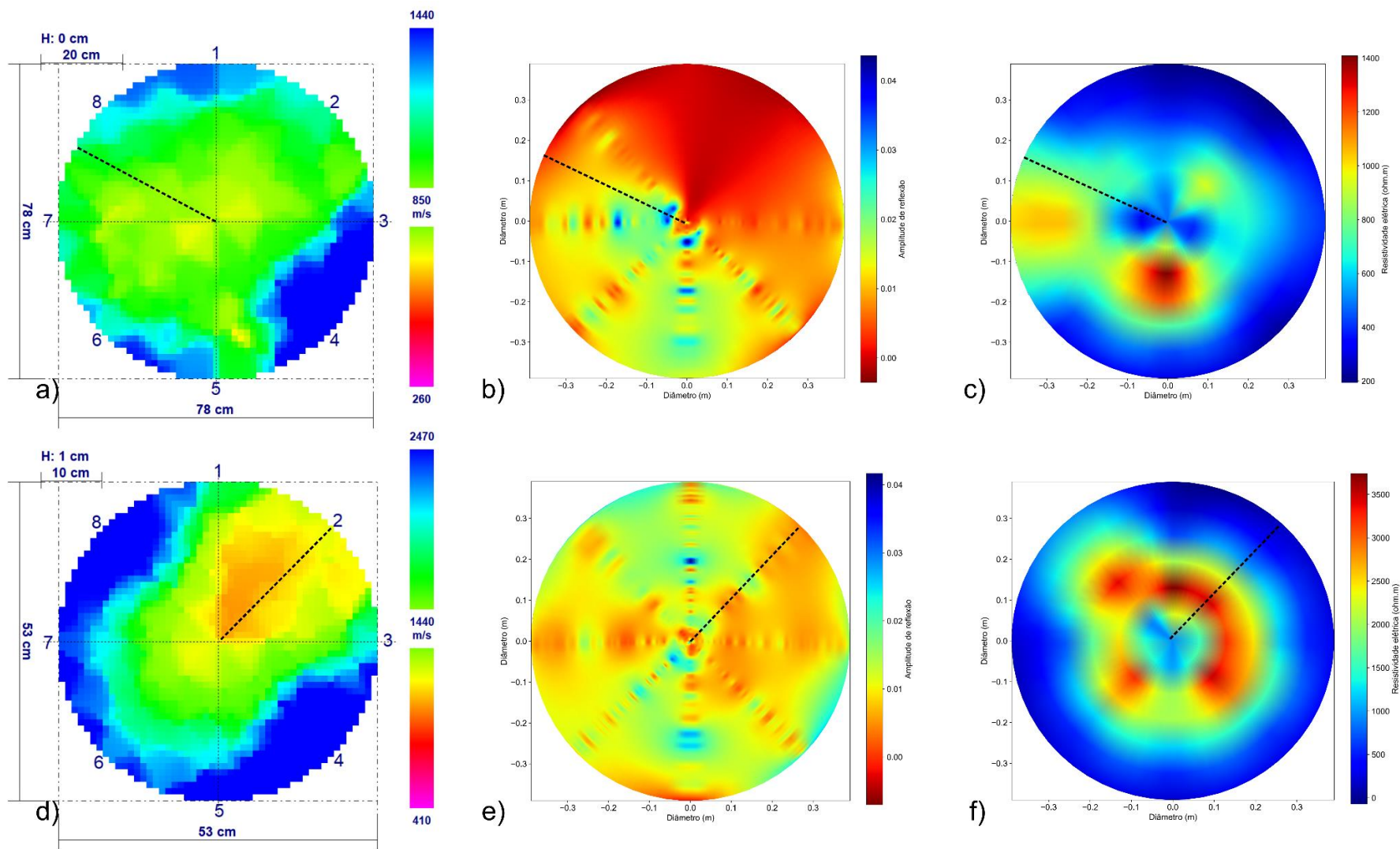


Figura 12: Resultados da análise de tronco do eucalipto EU2 (na base a 0,20 m de altura e no DAP a 1,30 m de altura) com tomografia sônica, GPR e eletrorresistividade (linha tracejada preta: posição da aquisição de dados de resistografia). a) Tomografia sônica na base. b) GPR na base. c) Eletrorresistividade na base. d) Tomografia sônica no DAP. e) GPR no DAP. f) Eletrorresistividade no DAP.

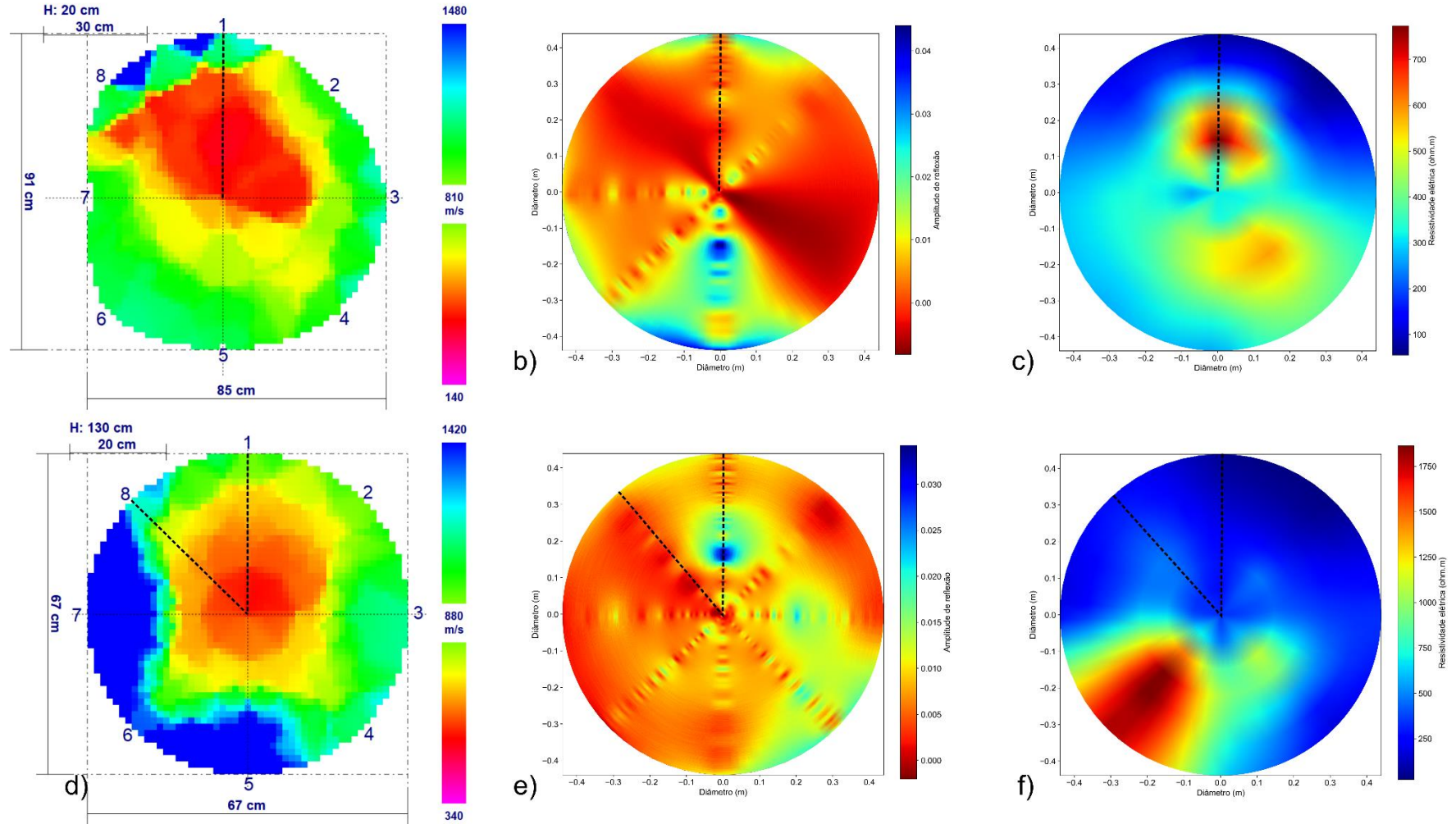


Figura 13: Resultados da análise de tronco do eucalipto EU3 (na base a 0,20 m de altura e no DAP a 1,30 m de altura) com tomografia sônica, GPR e eletrorresistividade (linha tracejada preta: posição da aquisição de dados de resistografia). a) Tomografia sônica na base. b) GPR na base. c) Eletrorresistividade na base. d) Tomografia sônica no DAP. e) GPR no DAP. f) Eletrorresistividade no DAP.

A seguir, serão apresentados os resultados da avaliação de troncos das mungubas. A Figura 14 mostra as seções de tronco obtidas para a munguba MG1, onde não apresenta nenhum defeito externo aparente. Na base (Figura 14a), a velocidade de propagação da onda mecânica máxima encontrada foi de 2090 m/s, com algumas regiões, nas posições entre 3-6, com velocidades de aproximadamente 1245 m/s. Para o método GPR (Figura 14b), a amplitude de reflexão variou entre -0,005 e 0,05 aproximadamente, com regiões apresentando baixa amplitude nas posições entre 5-7. A resistividade elétrica apresentou uma variação de 20 a 270 Ωm , com destaque para duas anomalias nas posições 3 e 7 (Figura 14c). Na altura do DAP (1,30 m), a velocidade máxima alcançada foi de 1780 m/s, apresentando também zonas com velocidades menores de aproximadamente 1005 m/s (Figura 14d). Já a amplitude de reflexão do georadar, nesta mesma altura, manteve a variação, com uma distribuição homogênea no interior do tronco (Figura 14e) e a resistividade manteve aproximadamente o intervalo entre 20 e 320 Ωm (Figura 14f).

Os resultados da avaliação do tronco da munguba MG2 podem ser vistos na Figura 15. Este exemplar apresenta uma cavidade aparente (localizada entre os sensores 4 e 5), desde a base até a altura de 1,50 m e, desta forma, foram adquiridos os dados de tomografia no DAP (1,30 m), para verificar a resposta das metodologias a essa cavidade. E, na altura de 1,80 m, tais dados foram obtidos para investigar se esta cavidade possuía continuidade além da parte visível. No DAP, a velocidade máxima encontrada foi de 1200 m/s e na porção onde está localizada a cavidade caiu para 600 m/s, aproximadamente (Figura 15a). É importante frisar que a velocidade encontrada é maior do que a velocidade do som no ar (340 m/s), apesar de haver a cavidade. Este efeito é conhecido como *Efeito Wielandt*, pois as ondas mecânicas tendem a desviar dessas regiões degradadas sobrestimando a velocidade (Socco et al., 2004). Já o GPR mostrou uma amplitude de reflexão variando entre -0,005 e 0,045 aproximadamente, não sendo possível identificar com clareza a região de cavidade (Figura 15b), uma vez que, diferentemente do tomógrafo, a onda EM se propaga na madeira e continua no ar, podendo refletir em qualquer alvo externo a árvore. A 1,80 m de altura, a tomografia mostrou uma região de velocidade mediana no centro do tronco, no valor de 670 m/s, onde o valor máximo foi de 1430 m/s (Figura 15c). A amplitude de reflexão do georadar variou de -0,005 a 0,03, aproximadamente, havendo pontos localizados de alta e baixa amplitudes (Figura 15d).

A Figura 16 apresenta as seções de tronco obtidas para a munguba MG3, que também apresenta defeitos externos visíveis, com presença de um formigueiro na base do tronco, na posição 4. Na base, a velocidade de propagação da onda mecânica máxima encontrada foi de 2210 m/s, onde é possível identificar uma região anômala de baixa velocidade (1000 m/s), na posição 4, coincidente ao formigueiro (Figura 16a). Para o método GPR (Figura 16b), a amplitude de reflexão variou de -0,005 a 0,065, com apenas uma região central de alta amplitude na posição 1. Na altura do DAP, a velocidade máxima alcançada foi de 1550 m/s, estando distribuída de maneira uniforme e apresentando pouca variação (Figura 16c). Já a amplitude de reflexão do georadar, nesta mesma altura, variou entre -0,001 a 0,04, aproximadamente, com destaque para a anomalia de alta amplitude na posição 2 (Figura 16e).

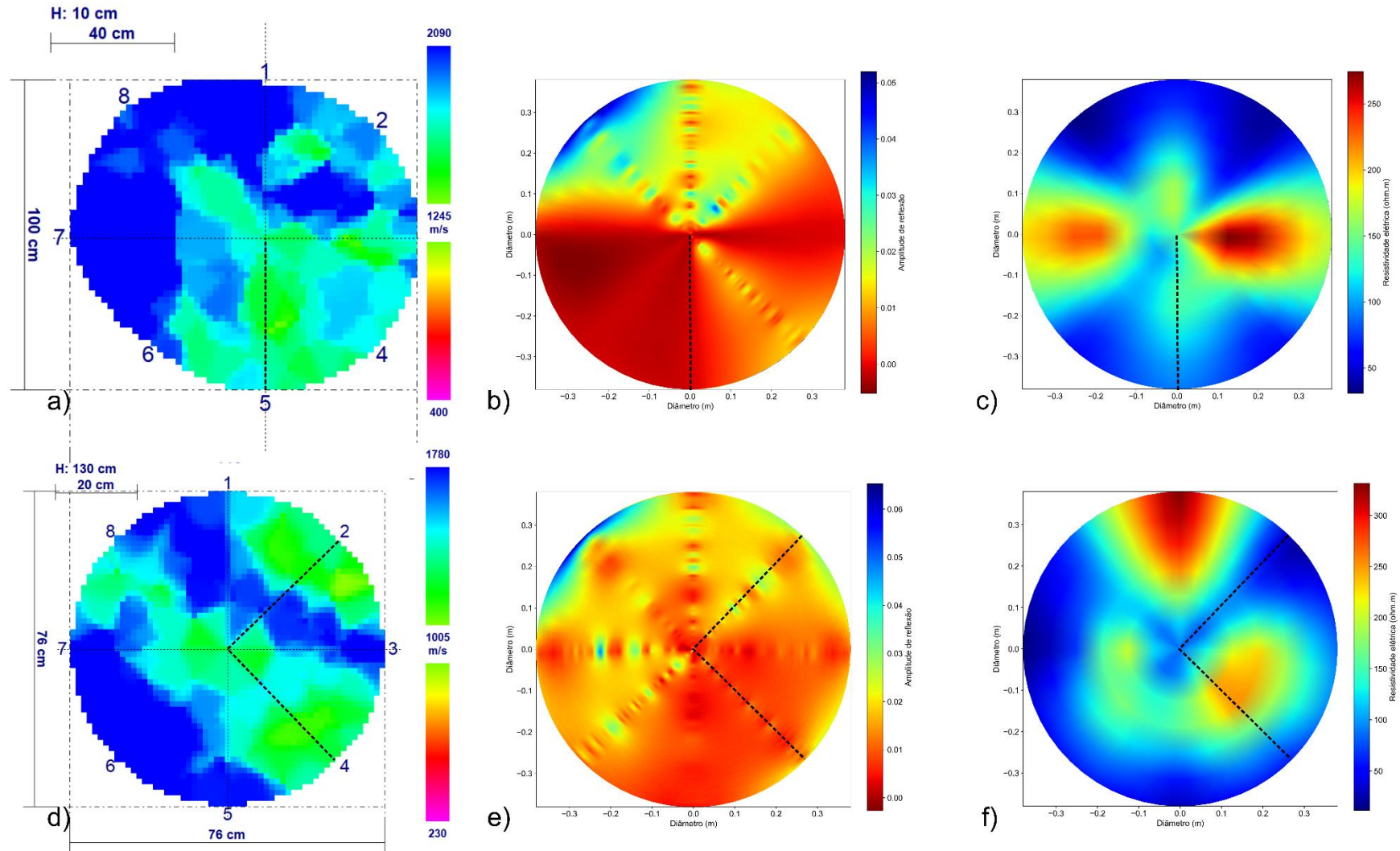


Figura 14: Resultados da análise de tronco da munguba MG1 (na base a 0,20 m de altura e no DAP a 1,30 m de altura) com tomografia sônica, GPR e eletrorresistividade (linha tracejada preta: posição da aquisição de dados de resistografia). a) Tomografia sônica na base. b) GPR na base. c) Eletrorresistividade na base. d) Tomografia sônica no DAP. e) GPR no DAP. f) Eletrorresistividade no DAP.

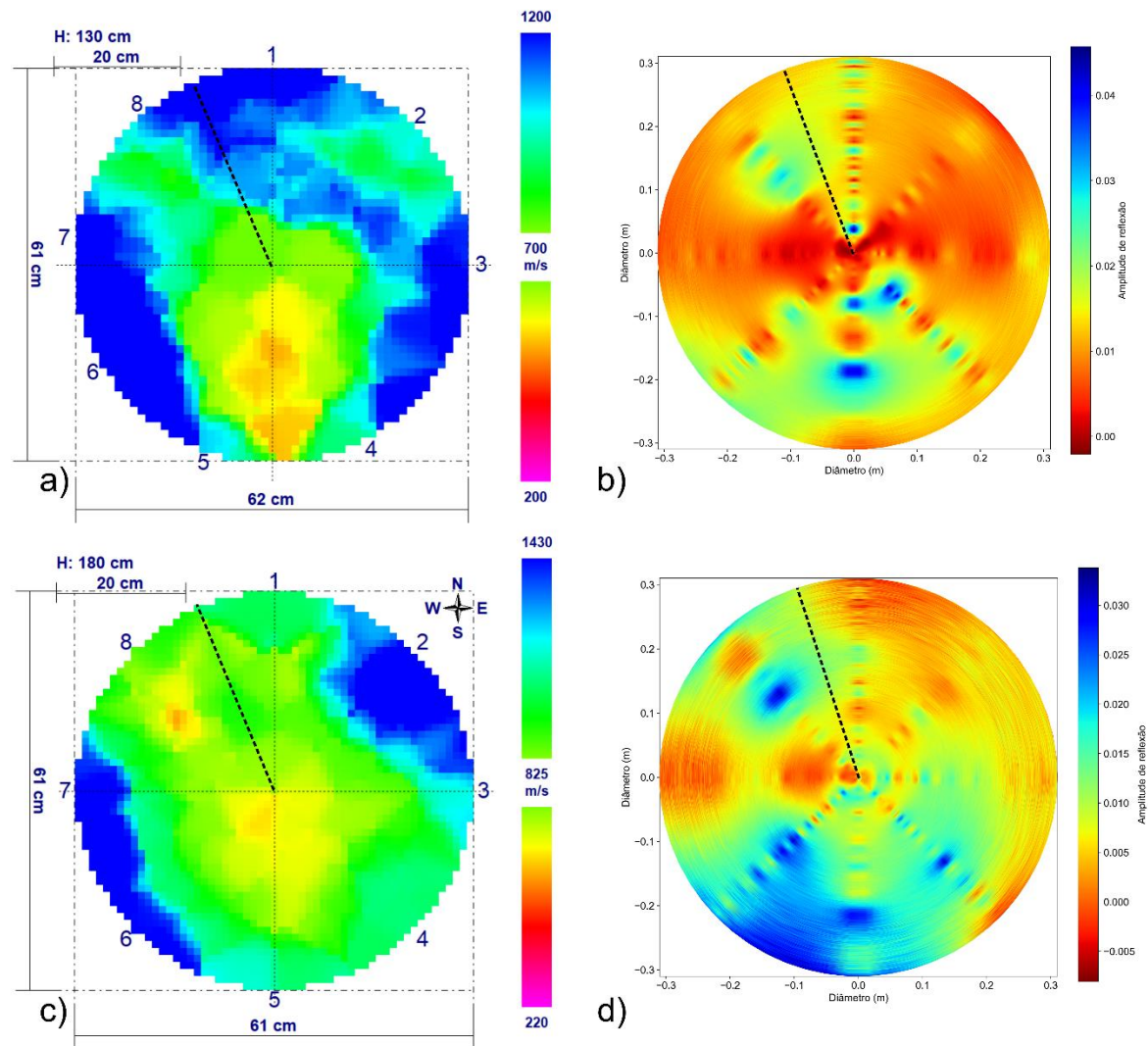


Figura 15: Resultados da análise de tronco da munguba MG2 (na base a 0,20 m de altura e no DAP a 1,30 m de altura) com tomografia sônica e GPR (linha tracejada preta: posição da aquisição de dados de resistografia). a) Tomografia sônica na base. b) GPR na base. c) Tomografia sônica no DAP. d) GPR no DAP.

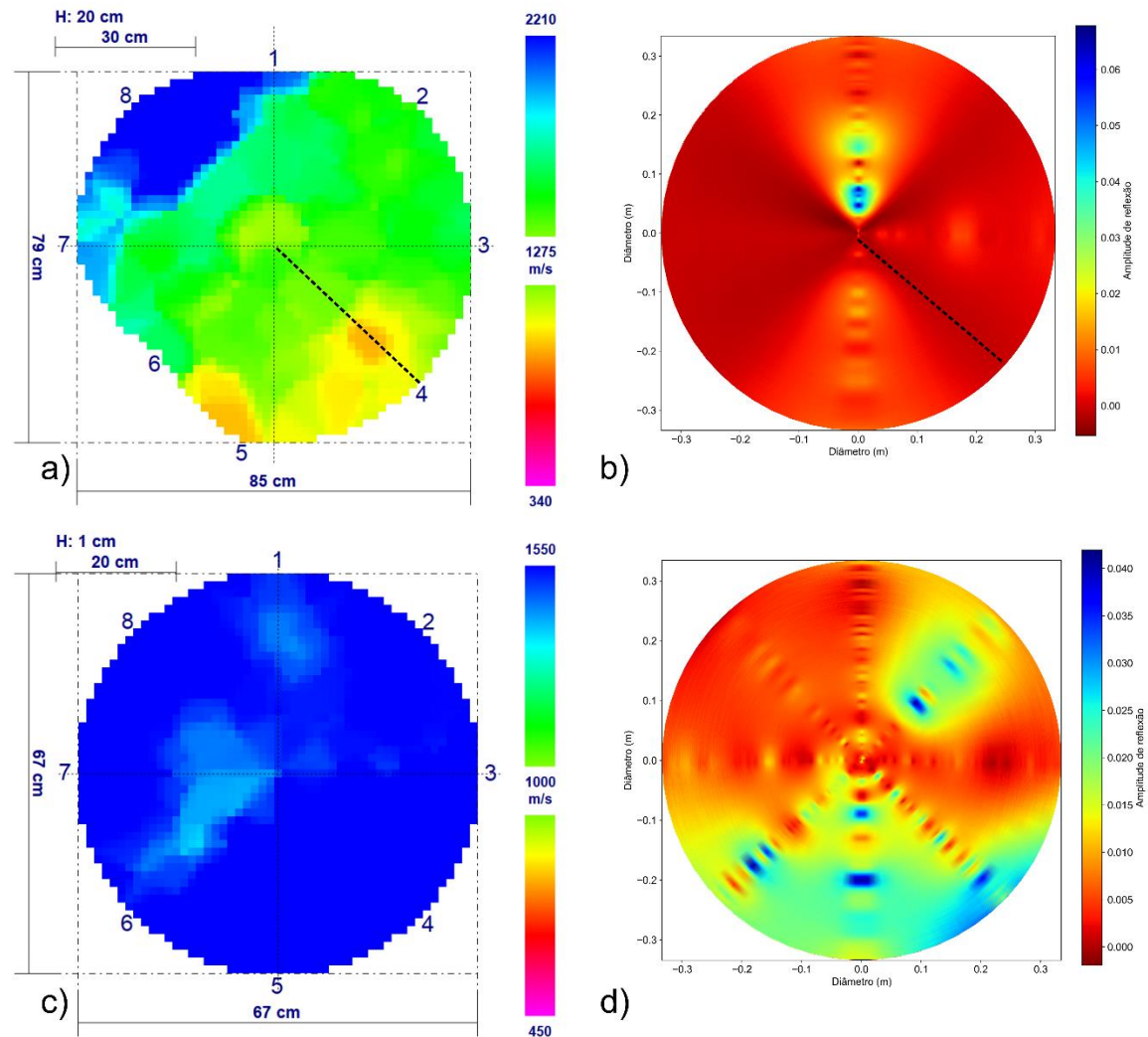


Figura 16: Resultados da análise de tronco da munguba MG3 (na base a 0,20 m de altura e no DAP a 1,30 m de altura) com tomografia sônica e GPR (linha tracejada preta: posição da aquisição de dados de resistografia). a) Tomografia sônica na base. b) GPR na base. c) Tomografia sônica no DAP. d) GPR no DAP.

Primeiramente, pela análise visual (qualitativa) das imagens das seções geradas nos eucaliptos e mungubas, não houve uma correlação direta entre as metodologias empregadas. Em alguns casos, a tomografia mostrou uma variação pequena de velocidade, como em EU1 e MG1, decorrente de alguma modificação no lenho, porém, mostrando que de fato esses exemplares estão íntegros, já nos outros casos, houve uma alteração significativa, apresentando um decaimento mais acentuado, como no EU3 e MG2.

O método geofísico GPR, por apresentar a distribuição de amplitudes de reflexão no interior do tronco, não retorna uma propriedade física intrínseca do material, como a velocidade ou resistividade elétrica (Annan, 1992), e por isto dificulta a interpretação do real significado dos resultados apresentados. Esta amplitude medida está relacionada com a capacidade em refletir a onda eletromagnética, onde maiores valores significam uma maior “refletividade” e vice-versa, e este fator depende do contraste existente entre o meio e o alvo analisado (Daniels, 2007). Nas seções apresentadas, é possível ver uma uniformidade maior apenas em EU1 e em todas as outras aparecem algum tipo de variação nesta amplitude, não sendo possível dar um significado apenas com as imagens. Para a resistividade elétrica, as seções apresentam coerência com o que já era esperado, de menores valores próximos à casca em decorrência do fluxo de seiva e maiores valores no cerne da árvore, sendo este mais seco não havendo transporte de água. Foram identificadas regiões de alteração concordantes com a tomografia, como na base do eucalipto EU3 e na munguba MG1.

Cada metodologia utiliza uma propriedade física diferente para caracterizar o mesmo meio. Desta forma, é preciso também analisar os valores encontrados (análise quantitativa) para cada método e verificar se existe algum tipo de relação entre eles. A Tabela 3 apresenta os valores máximos e mínimos, em cada altura avaliada, da velocidade de propagação da onda mecânica, da amplitude de reflexão do GPR e da resistividade elétrica obtida pelo método da eletrorresistividade. Na maioria dos casos analisados o decaimento da velocidade ficou em 41%, sendo que a maior diferença ocorreu no eucalipto EU3, com 68% de decaimento, seguido pela munguba MG2 com 53%. Apesar da grande diferença entre as densidades das duas espécies, as velocidades médias de propagação da onda possuem pouca variação, com 1751 m/s para o eucalipto e 1337 m/s para a munguba.

As amplitudes de reflexão do GPR apresentaram uma uniformidade, porém, foi possível determinar uma distinção dos valores médios entre as espécies, com os eucaliptos apresentando valores maiores e variando entre -0,066 e 0,087 e as mungubas, menores, com -0,004 e 0,047. A resistividade elétrica também mostrou o mesmo comportamento, com a média de resistividade do eucalipto maior (980 Ωm) em relação a munguba (160 Ωm), contudo, só foi analisado um exemplar de munguba, não servindo como parâmetro de comparação, pois não é confirmatório que essa espécie possui menores valores de resistividade elétrica ou se foi uma particularidade da árvore avaliada.

Tabela 3: Comparação entre os valores máximos e mínimos das propriedades físicas analisadas (velocidade de propagação da onda mecânica, amplitude de reflexão e resistividade elétrica).

Exemplar	Velocidade máxima (m/s)	Velocidade mínima (m/s)	Amplitude reflexão máxima	Amplitude reflexão mínima	Resistividade elétrica máxima (Ωm)	Resistividade elétrica mínima (Ωm)
EU1 base	2830	1685	0,2	-0,13	-	-
EU1 DAP	1740	750	0,15	-0,15	-	-
EU2 base	1440	850	0,05	-0,05	1400	200
EU2 DAP	2470	1100	0,05	-0,05	3500	100
EU3 base	1480	475	0,04	-0,01	750	50
EU3 DAP	1420	610	0,03	-0,005	1750	100
MG1 base	2090	1245	0,05	-0,005	270	20
MG1 DAP	1780	1005	0,05	-0,005	320	20
MG2 DAP	1200	600	0,045	-0,005	-	-
MG2 1,80m	1430	670	0,03	-0,005	-	-
MG3 base	2210	1000	0,065	-0,005	-	-
MG3 DAP	1550	1275	0,04	-0,001	-	-

As Figuras 17 e 18 mostram as comparações da resistografia com a variação da amplitude de reflexão do GPR para o eucalipto EU1, na base a árvore entre as posições 7 e 8 e na altura do DAP na posição 2, respectivamente. A resistência à penetração da broca atingiu um patamar de 60% aproximadamente, mostrando uma madeira mais dura, sem a presença de lesões internas. Na base, a amplitude de reflexão acompanhou a tendência de subida do resistógrafo até 5 cm e após isto houve uma diminuição. Já no DAP, tanto a resistência quanto a amplitude apresentaram tendência de subida, sendo bastante semelhante o comportamento das duas curvas. Nestes dois locais, a tomografia mostrou uma diminuição da velocidade de propagação mais acentuada a 1,30 m de altura, entretanto, a madeira apresenta-se em bom estado, como mostrado pelo resistógrafo. Uma hipótese para este comportamento seria uma possível mudança no teor de umidade no lenho, causando a redução da velocidade e a variação da amplitude de reflexão do georadar.

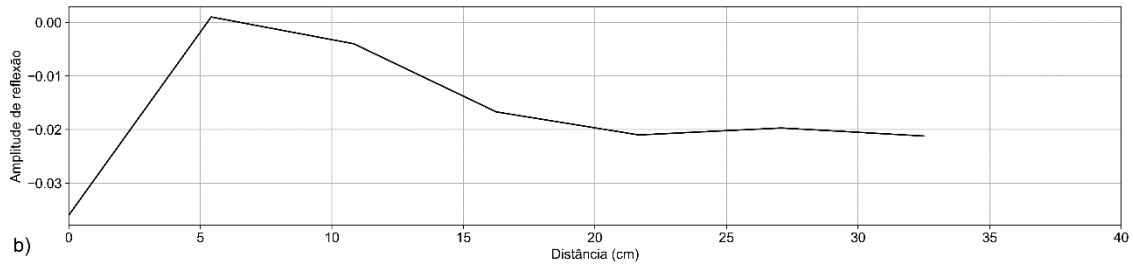
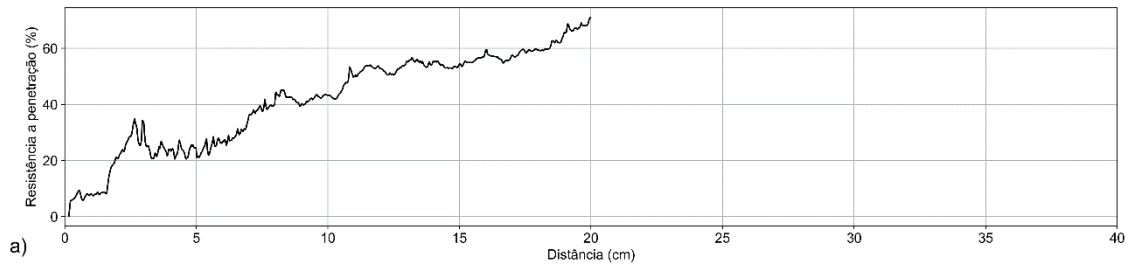


Figura 17: Comparação entre resistografia (a) e amplitude de reflexão GPR (b) para o eucalipto EUI, na base e posição 7-8.

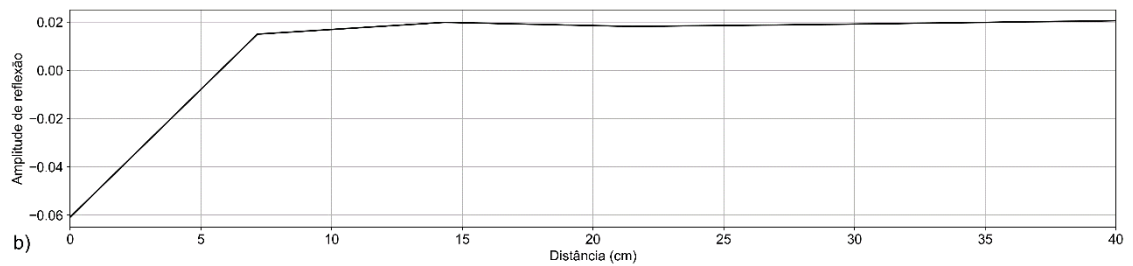
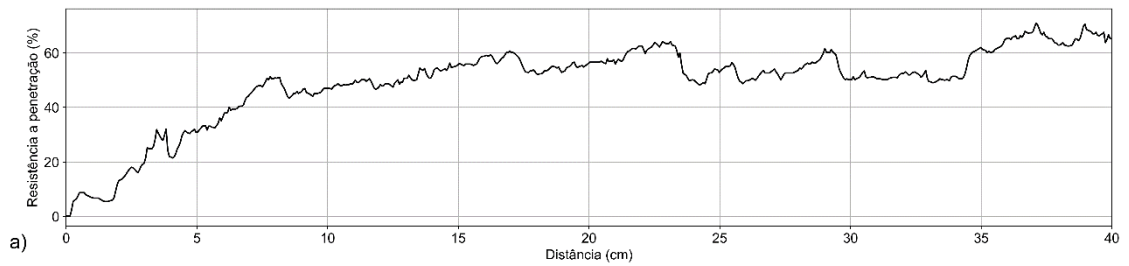


Figura 18: Comparação entre resistografia (a) e amplitude de reflexão GPR (b) para o eucalipto EUI, no DAP e posição 2.

No eucalipto EU2 foram analisados dois locais com a resistografia, na base e posição entre os sensores 7 e 8 e no DAP na posição 2 (Figuras 19 e 20). As duas alturas atingiram uma resistência máxima de 60%, apresentando diminuições em locais pontuais, em 7 cm (base), caindo para menos de 10%, e 11 cm (DAP), com queda para 30%, aproximadamente.

Coincidentemente, na posição de 7 cm para a base, a amplitude de reflexão da onda EM do GPR começa a diminuir, bem como constata-se que toda a região possui velocidades medianas, em torno de 850 m/s, mostrando a existência de um tecido diferente do entorno. Já para os valores de resistividade elétrica, este local apresentou valores altos, indicando uma madeira mais seca e a medida que a distância aumenta para o cerne, estes valores diminuem, possivelmente estando relacionada à variação do conteúdo de água no interior do tronco.

Já para a altura do DAP, existe um decaimento mais acentuado da velocidade da onda mecânica, em aproximadamente 26 cm da extremidade, local onde ocorre uma diminuição dos valores de amplitude de reflexão e um aumento da resistividade elétrica, sendo que esta última propriedade apresenta valores muito elevados, característicos de cavidade, da ordem de 4000 Ωm , contudo, houve apenas uma leve diminuição da resistência à penetração da broca, caindo para 35%, não indicando a presença desta cavidade e sim de uma material bem mais seco que seu entorno.

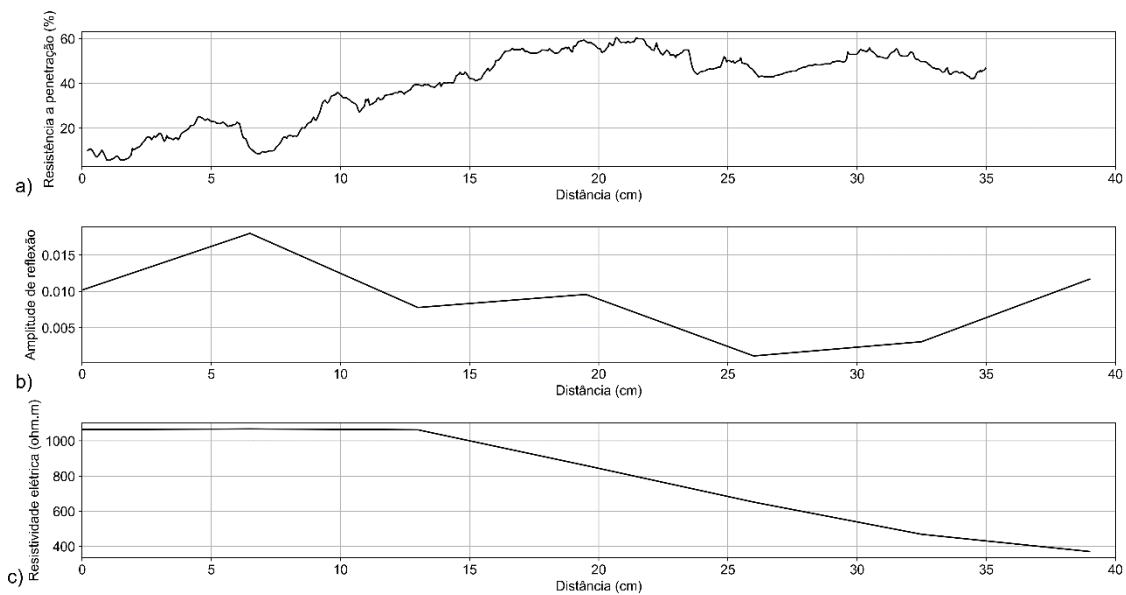


Figura 19: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para o eucalipto EU2, na base e posição 7-8.

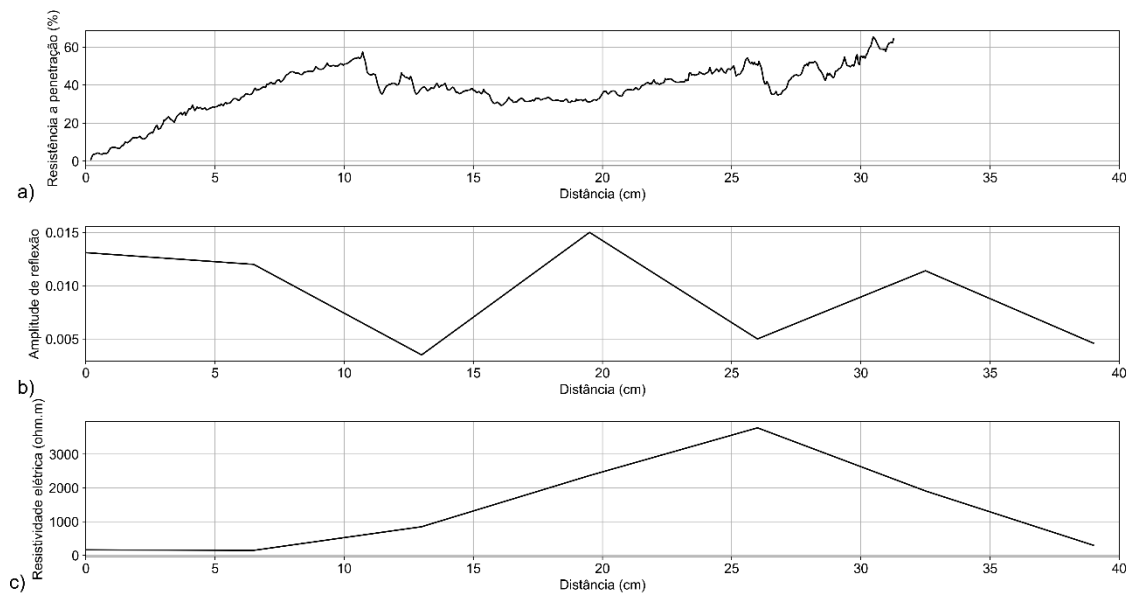


Figura 20: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para o eucalipto EU2, no DAP base e posição 2.

O eucalipto EU3 apresentou a menor resistência a penetração do resistógrafo, com valores máximos de 45%, aproximadamente. A base foi quem apresentou a menor resistência, com 30%. Foram adquiridos dados na base e posição 1 (Figura 21), e na altura do DAP nas posições 1 (Figura 22) e 8 (Figura 23). Pela tomografia, este exemplar apresentou um decaimento acentuado das velocidades, nas duas alturas.

Na base, a resistografia registrou uma queda acentuada entre 5 e 15 cm, com valor de 9%. Pela tomografia, a região com velocidade baixa, de 400 m/s, teve início em 11 cm indo até o centro (45,5 cm), já o GPR mostrou uma diminuição na amplitude reflexão mais proeminente e a resistividade elétrica um valor mais elevado de aproximadamente 800 Ωm , ambos na distância de 22 cm da extremidade, coincidindo com o centro da anomalia mostrada pelo tomógrafo. Tanto os dados de velocidade, quanto dos métodos geofísicos não mostraram uma concordância com o resultado obtido pelo resistógrafo, ou seja, indicando as variações nas mesmas posições, porém, como nesta região a resistência a penetração já apresentou valores bastante reduzidos e com variações recorrentes, pode-se concluir que os métodos indiretos mostraram uma região de abrangência de um possível decaimento da qualidade da madeira deste eucalipto.

Em 1,30 m de altura (DAP) a resistência a penetração mostrou uma madeira um pouco mais firme em relação a base. A tomografia mostrou uma redução na velocidade de propagação, atingindo 610 m/s, localizada no centro do tronco, iniciando em 17 cm. Nesta mesma posição a resistografia na posição 1 apresentou uma queda nos valores, caindo de 40% para 10%, marcada também no GPR e eletrorresistividade por uma diminuição nos valores. Na posição 8, o resistógrafo apresentou um comportamento normal, com aumento dos valores ao atingir o cerne do tronco. Destaca-se na distância de 29 cm um crescimento da amplitude do GPR e da resistividade elétrica, coincidindo com o mínimo da velocidade obtida pelo tomógrafo.

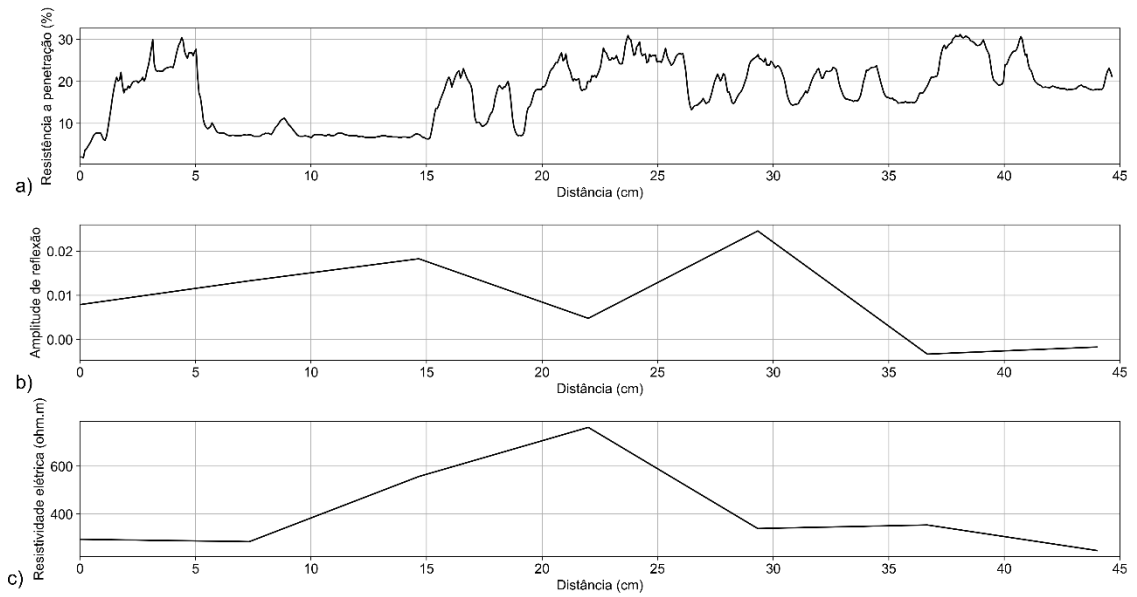


Figura 21: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para o eucalipto EU3, na base e posição 1.

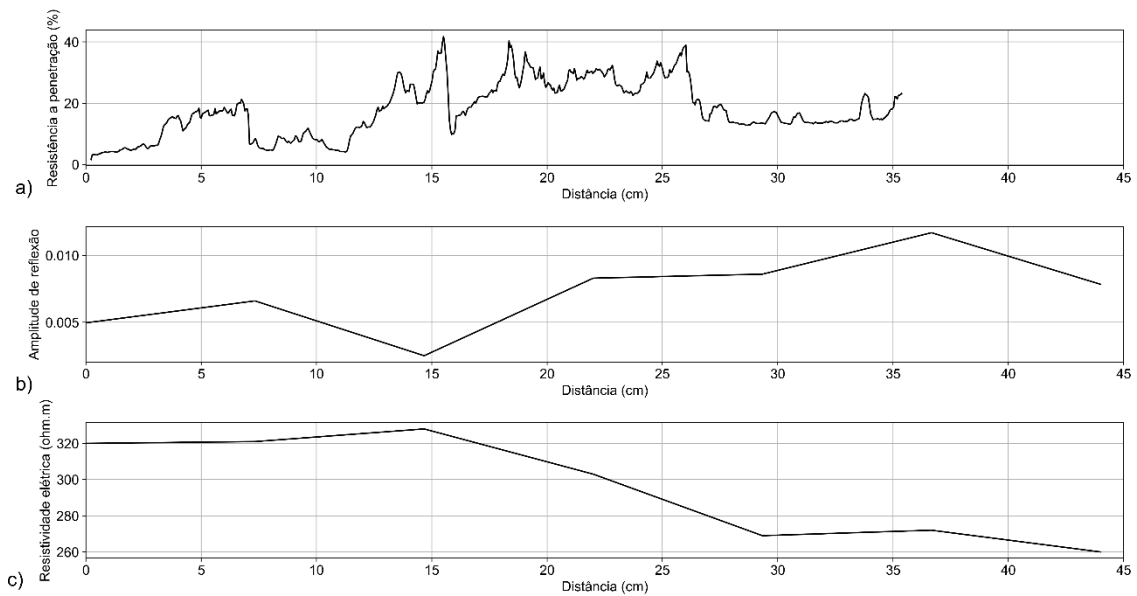


Figura 22: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para o eucalipto EU3, no DAP e posição 1.

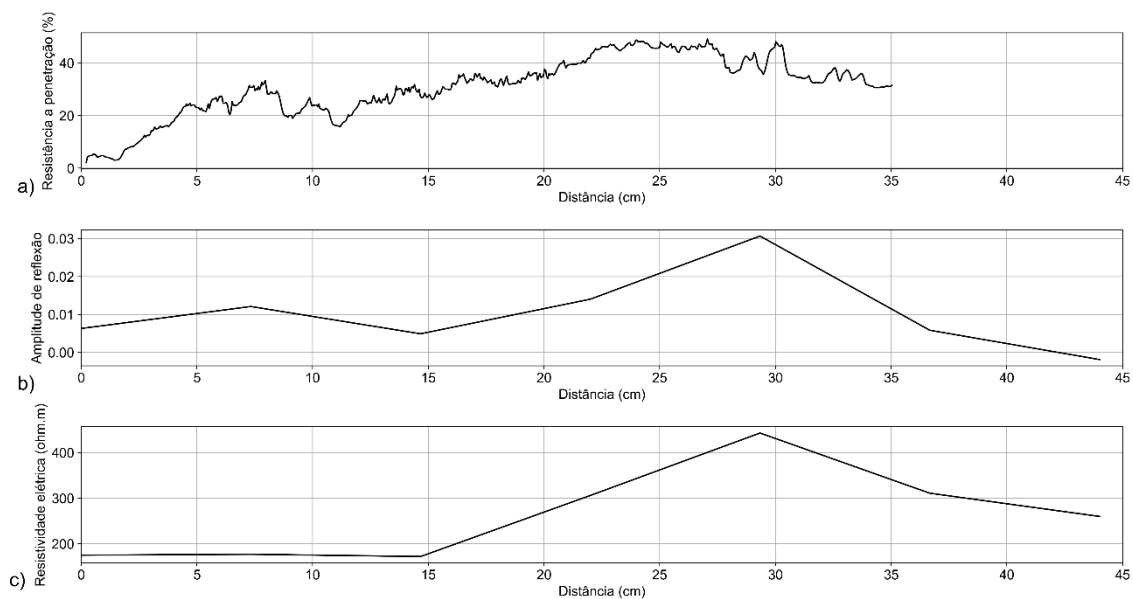


Figura 23: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para o eucalipto EU3, no DAP e posição 8.

Após realizar a resistografia nos exemplares de munguba, foi possível confirmar a diferença de densidade existente entre as duas espécies. Com uma densidade menor e consequentemente uma madeira mais mole em relação aos eucaliptos, a resistência a penetração da broca não passou dos 16% nos exemplares avaliados. Em MG1 foi realizada a resistografia na base, na posição 5 (Figura 24) e no DAP, nas posições 2 (Figura 25) e 4 (Figura 26). Na base, a resistência da broca atingiu pouco mais de 15%, não apresentando nenhuma local com indicativo de lesão interno, já o GPR e a resistividade elétrica mostraram uma variação suave com o aumento da distância, também não apontando nenhuma região anômala.

Na altura do DAP e posição 2, a resistografia também não apresentou nenhuma variação significativa, atingindo uma resistência máxima de 15%, aproximadamente. Entretanto, a amplitude de reflexão do GPR apresentou um comportamento com uma variação cíclica, alternando valores maiores e menores, não tendo nenhuma relação com a resistografia. Com a resistividade elétrica foi possível observar variação ao longo da distância, diminuindo os valores, ocorrendo o oposto do que normalmente é encontrado nas árvores. Na região da posição 4, a resistência apresentou os menores valores, alcançando aproximadamente 11%, com diminuição a amplitude do GPR e uma região entre 15 e 20 cm, aproximadamente, de aumento da resistividade elétrica, coincidindo com o local de baixa velocidade (1005 m/s) mostrada pelo tomógrafo.

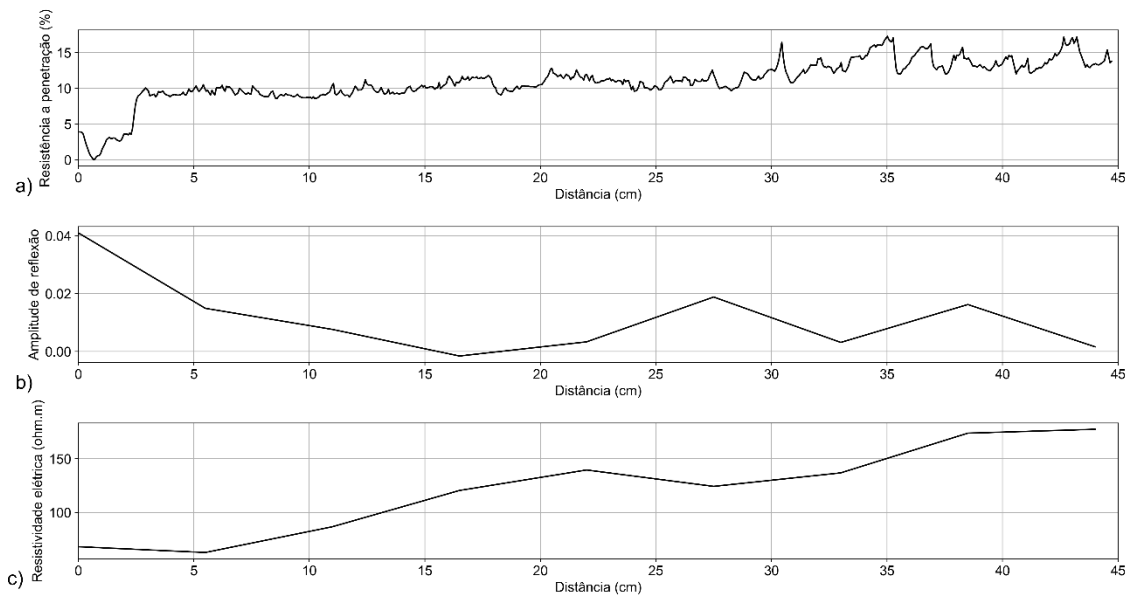


Figura 24: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para a munguba MGI, na base e posição 5.

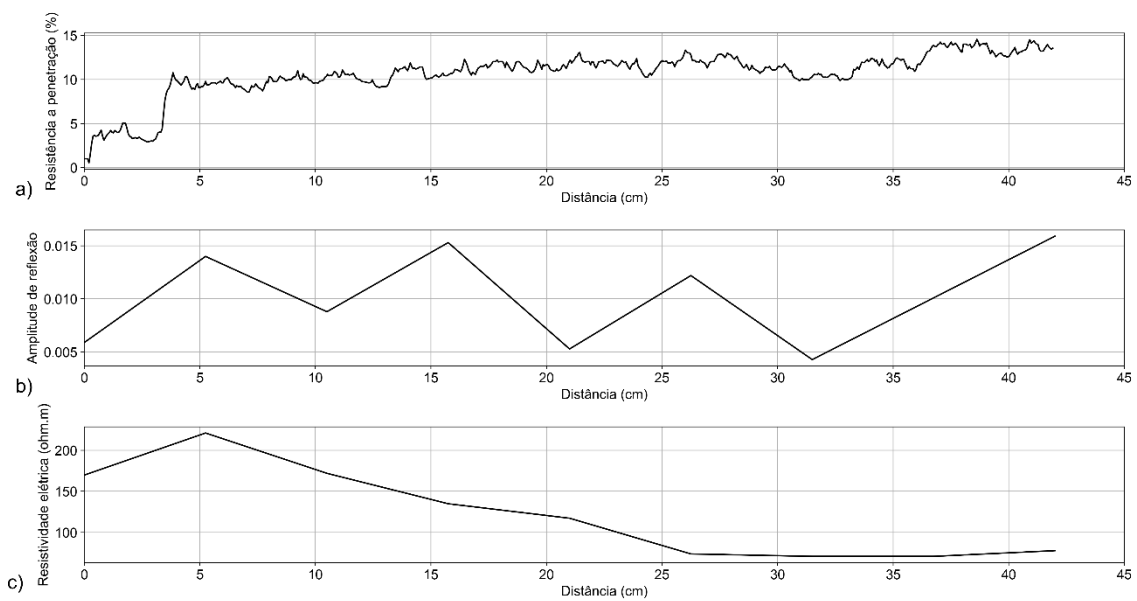


Figura 25: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para a munguba MGI, no DAP e posição 2.

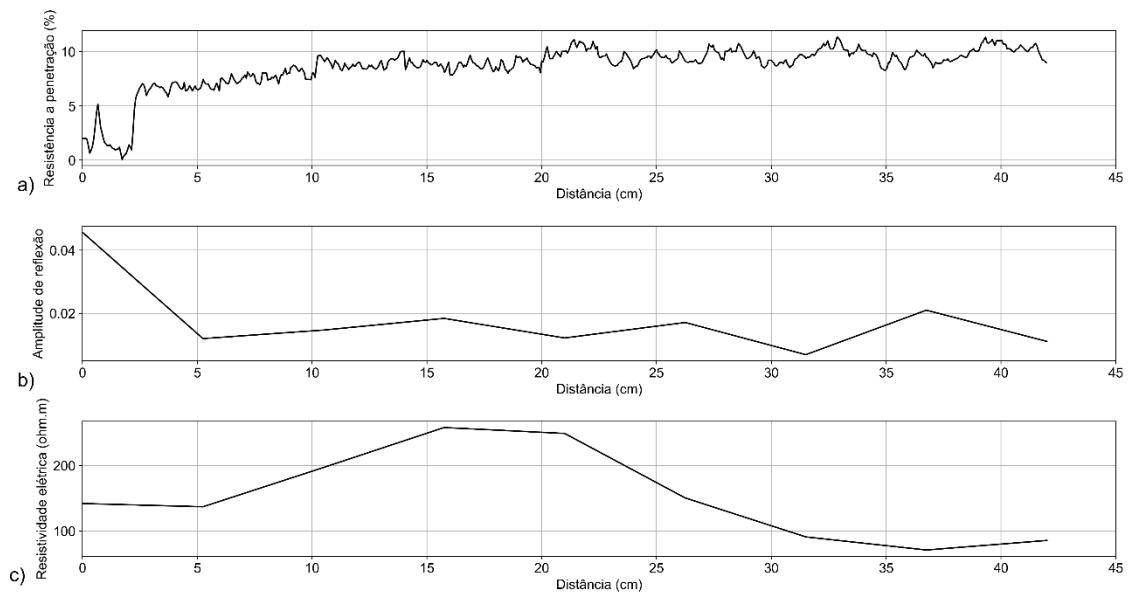


Figura 26: Comparação entre resistografia (a), amplitude de reflexão GPR (b) e resistividade elétrica (c) para a munguba MG1, no DAP e posição 4.

A munguba MG2 apresenta uma cavidade aparente desde a base até 1,50 m de altura, localizada entre os sensores 4 e 5. Foram feitas as resistografias nas alturas do DAP a 1,30 m (Figura 27) e a 1,80 m (Figura 28), ambas entre os sensores 8 e 1. Pelos resultados é possível determinar a espessura de madeira remanescente na primeira aquisição, restando apenas 23 cm de parede, aproximadamente, na segunda, a partir de 24 cm, o decaimento já é acentuado, para 2,5%, mostrando um material muito friável e com um possível início de cavidade. A amplitude de reflexão apresentou uma queda a partir de 22 cm nas duas alturas, apresentando uma coerência com o resistógrafo.

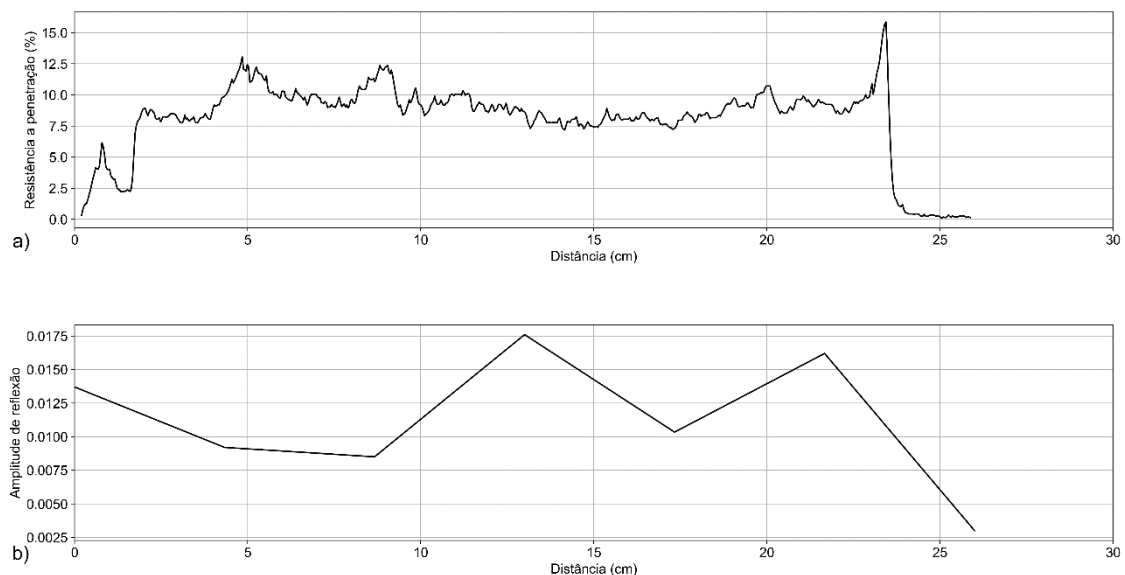


Figura 27: Comparação entre resistografia (a) e amplitude de reflexão GPR (b) para a munguba MG2, no DAP e posição 8-1.

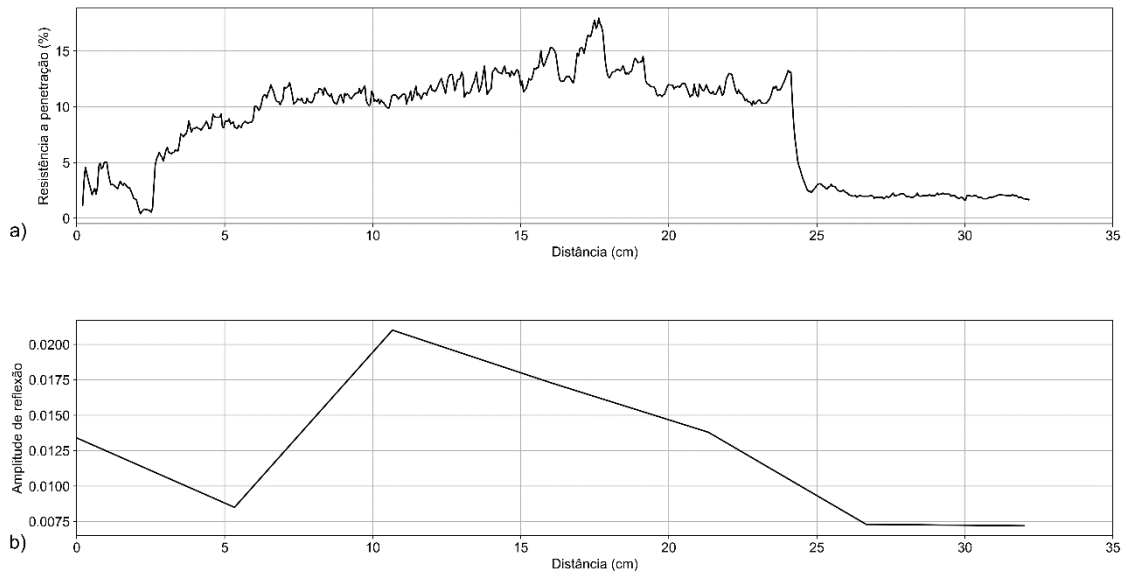


Figura 28: Comparação entre resistografia (a) e amplitude de reflexão GPR (b) para a munguba MG2, na altura de 1,80 m e posição 8-1.

A Figura 29 mostra a comparação entre a resistografia e a amplitude de reflexão do GPR para a munguba MG3, na base e posição 4. Este exemplar também apresentou uma resistência baixa a penetração, com máximo de 12,5%. No local da perfuração existe um decaimento da velocidade do tomógrafo, a 15 cm da extremidade do tronco aproximadamente, próximo a uma diminuição na resistência de entrada da broca (10 cm), variando entre 6% e 10%. Neste mesmo ponto a amplitude de reflexão também apresentou uma diminuição, porém, volta a aumentar entre 15 cm e 22 cm, coincidindo com o tomógrafo, atingindo seu máximo, voltando a cair até atingir a distância do seu raio.

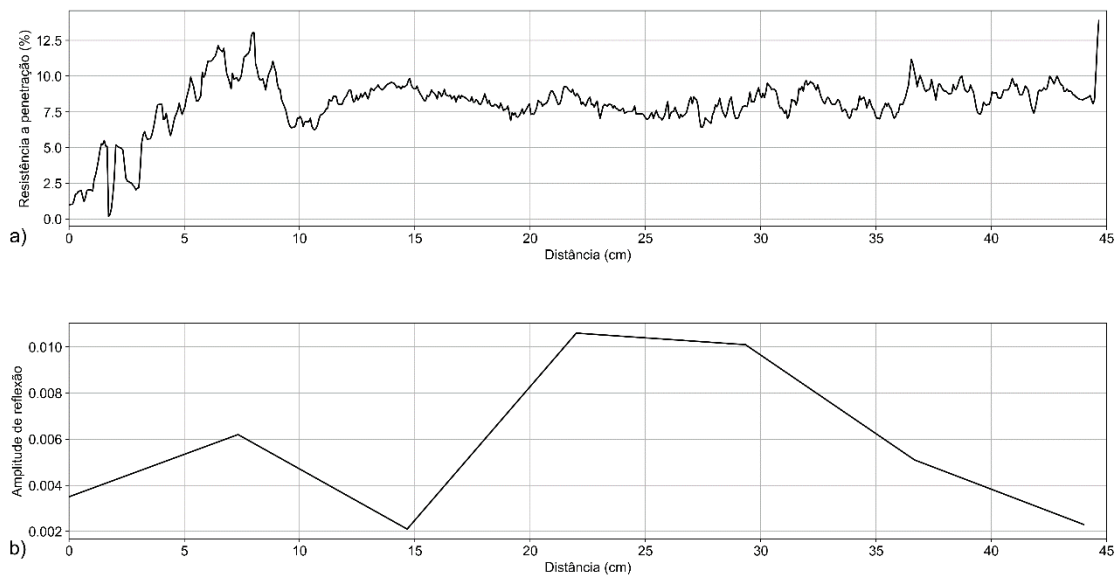


Figura 29: Comparação entre resistografia (a) e amplitude de reflexão GPR (b) para a munguba MG3, na base e posição 4.

Para a verificação das diferenças entre os exemplares considerados saudáveis e os com possível danos internos, foram geradas seções na mesma escala de cores para o georadar e eletrorresistividade. A Figura 30 apresenta a comparação do GPR para os exemplares de eucalipto EU1 (Figuras 30a e 30b), EU2 (Figuras 30c e 30d) e EU3 (Figuras 30e e 30f), na base e DAP. Pela figura é possível visualizar que EU1 apresenta pouca variação de amplitude, sendo mais constante e homogênea, diferentemente dos EU2 e EU3 que apresentam pontos de anomalia de alta amplitude. Esta pouca variabilidade com amplitudes de reflexão mais baixas podem ser um indicativo de uma árvore mais saudável. Já para a eletrorresistividade (Figura 31), a resistividade elétrica variou de 50 a 1700 Ωm , onde tanto o EU2 (Figuras 31a e 31b), quanto o EU3 (Figuras 31c e 31d) apresentam anomalias de alta resistividade na região do alburno.

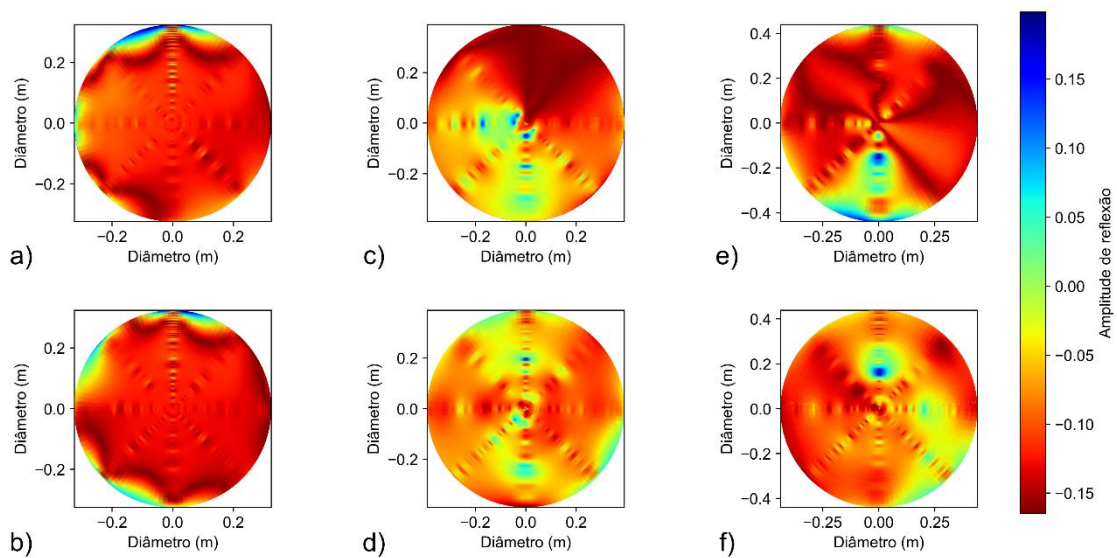


Figura 30: Comparação entre as seções obtidas pelo método GPR para os eucaliptos. a) Eucalipto EU1, na base. b) Eucalipto EU1, no DAP. c) Eucalipto EU2, na base. d) Eucalipto EU2, no DAP. e) Eucalipto EU3, na base. f) Eucalipto EU3, no DAP.

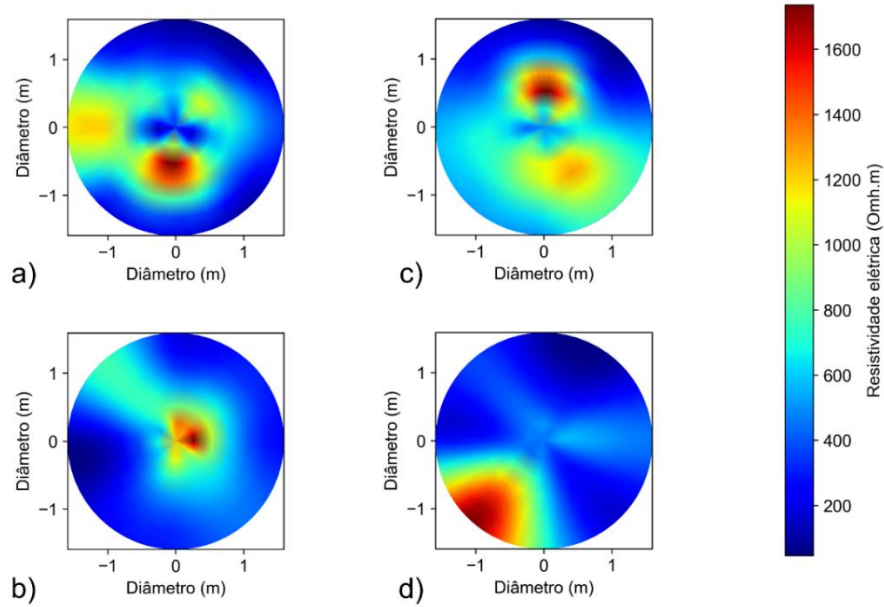


Figura 31: Comparação entre as seções obtidas pelo método da eletrorresistividade para os eucaliptos. a) Eucalipto EU2, na base. b) Eucalipto EU2, no DAP. c) Eucalipto EU3, na base. d) Eucalipto EU3, no DAP.

Nas mungubas (Figura 32), o GPR apresentou variações nos três exemplares, diferentemente dos eucaliptos, onde foi possível classificar a EU1 como saudável por não apresentar essas variações. Apesar de ser classificada como saudável, a munguba MG1 (Figura 32a e 32b) apresentou algumas anomalias internas, mais evidentes na base, podendo ser causadas por diferenças na anatomia interna da árvore. Outro fator importante encontrado foi da amplitude máxima entre as espécies, onde os eucaliptos apresentaram maiores valores em relação às mungubas, possivelmente relacionadas às densidades de cada uma.

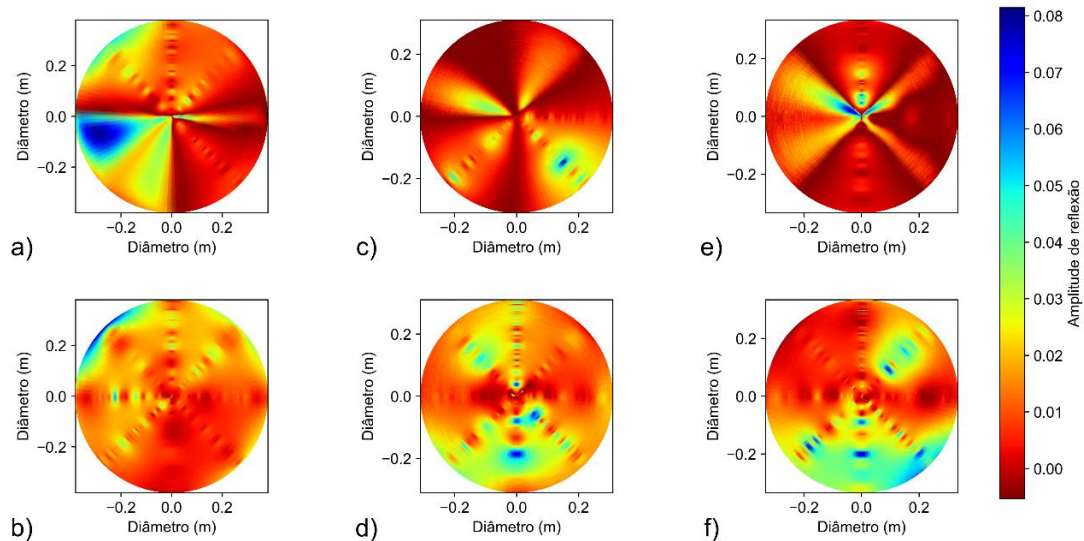


Figura 32: Comparação entre as seções obtidas pelo método GPR para as mungubas. a) Munguba MG1, na base. b) Munguba MG1, no DAP. c) Munguba MG2, no DAP. d) Munguba MG2, na altura de 1,80 m. e) Munguba MG3, na base. f) Munguba MG3, no DAP.

4.2 Raízes

Já nos resultados da avaliação de raízes, primeiramente é mostrada a distribuição espacial em função da profundidade do sistema radicular, bem como a do diâmetro destas estruturas. Em conjunto é mostrado o diagrama de velocidades resultante da aquisição com o tomógrafo de raízes.

As Figuras A1, A2 e A3 (apresentadas no Anexo A) mostram os cortes em profundidade dos dados GPR em raízes para o abricó de macaco (AM) e as duas seringueiras (SG1 e SG2), respectivamente. Os cortes variam desde 0,05 m a 0,82 m, mostrando a posição da árvore (representada pela vista superior da copa) e os alinhamentos contínuos decorrentes das raízes em subsuperfície (em roxo mais escuro). A partir destes dados foi possível obter a distribuição espacial em função da profundidade e do diâmetro do sistema radicular.

Os resultados da avaliação do sistema radicular do abricó de macaco (AM) podem ser visualizados na Figura 33. As Figuras 33a e 33b mostram a distribuição espacial em função da profundidade e do diâmetro, respectivamente, obtidos pelo GPR. Já a Figura 35c apresenta o diagrama de velocidades, utilizando o tomógrafo de impulso mecânico. O sistema radicular mapeado apresenta boa distribuição, em todas as direções, com profundidades variando de 0,11 m a 0,80 m e diâmetros entre 5 e 15 cm. Já as velocidades variaram entre 66 m/s e 453 m/s, com raízes sendo identificadas nas nove posições de medidas (R1 a R9).

Os resultados para a seringueira SG1 podem ser visualizados na Figura 34. As raízes deste exemplar também se encontram bem desenvolvidos, com profundidades variando de 0,05 m a 0,50 m (Figura 34a) e diâmetros de 5 a 11 cm (Figura 34b). Com o tomógrafo obteve-se um intervalo de velocidade de 92 m/s a 390 m/s, onde foram identificadas raízes em todas as sete posições de medida (R1 a R7).

Já para a seringueira SG2 (Figura 35), as raízes estão predominantemente entre 0,11 m e 0,70 m de profundidade (Figura 35a), com diâmetros variando de 5 cm a 15 cm (Figura 35b). As velocidades obtidas pelo tomógrafo vão de 89 m/s a 318 m/s, nas sete posições de aquisição, R1 a R7 (Figura 35c).

Já para a avaliação do sistema radicular utilizando o tomógrafo de impulso mecânico e o GPR, foi possível estabelecer uma relação espacial apenas, pois o primeiro método estima a presença ou não destas estruturas no subsolo, com base na velocidade de propagação da onda mecânica e fornecendo a sanidade as mesmas, já com o segundo é possível discretizar cada raiz com a sua posição, profundidade e diâmetro. Segundo Pereira (2017), é possível obter a estimativa de sanidade a partir dos valores de velocidades encontradas pelo tomógrafo:

- I) Maior que 437,5 m/s: raízes sadias, com tecidos íntegros, sem sinais de degradação, cortes ou impedimento de crescimento;
- II) Entre 312,5 e 437,5 m/s: raízes com grau de degradação inicial, com comprometimento dos tecidos radiculares pela ação de agentes bióticos (excesso de umidade, fungos, cupins etc.) ou antrópicos (danos, cortes etc.), com redução da capacidade de captar nutrientes;
- III) Entre 187,5 e 312,5 m/s: raízes com degradação intermediária, com tecidos já

apodrecidos ou degradados e com reflexo nos tecidos foliares, como modificação no tamanho e coloração as folhas;

- IV) Entre 62,5 e 187,5 m/s: grau de degradação severa, com redução drástica de absorção de nutrientes, com modificações morfológicas nos tecidos foliares, profusão de galhos secos e perda da casca e são árvores com risco elevado de queda;
- V) Menor que 62,5 m/s: grau de degradação severo, com colapso dos tecidos radiculares, cessando por completo a captação e distribuição de nutrientes e são consideradas árvores de alto risco de queda, com recomendação a supressão.

No abricó de macaco (AM) a velocidade variou entre 66 e 453 m/s, prevalecendo o valor de 162,5 m/s (cor rosa), mostrando um grau mais severo de degradação. Na seringueira (SG1), a velocidade ficou entre 92 e 390 m/s, com valores médios de 241 m/s, mostrando raízes com uma degradação intermediária e na SG3. A variação ficou entre 89 a 318 m/s, com valores médios de 203 m/s, indicando também uma degradação intermediária das raízes. A Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros encontrados para o mapeamento de raízes. De uma maneira geral, houve uma concordância espacial no mapeamento das raízes entre os dois métodos utilizados para os três exemplares.

Tabela 4: *Resumo dos parâmetros encontrados para as raízes.*

Indivíduo	Velocidade mínima (m/s)	Velocidade máxima (m/s)	Velocidade média (m/s)	Profundidade máxima (m)	Diâmetros (cm)
AM	66	453	162,5	0,8	5-15
SG1	92	390	241	0,5	5-11
SG2	89	318	203	0,7	5-15

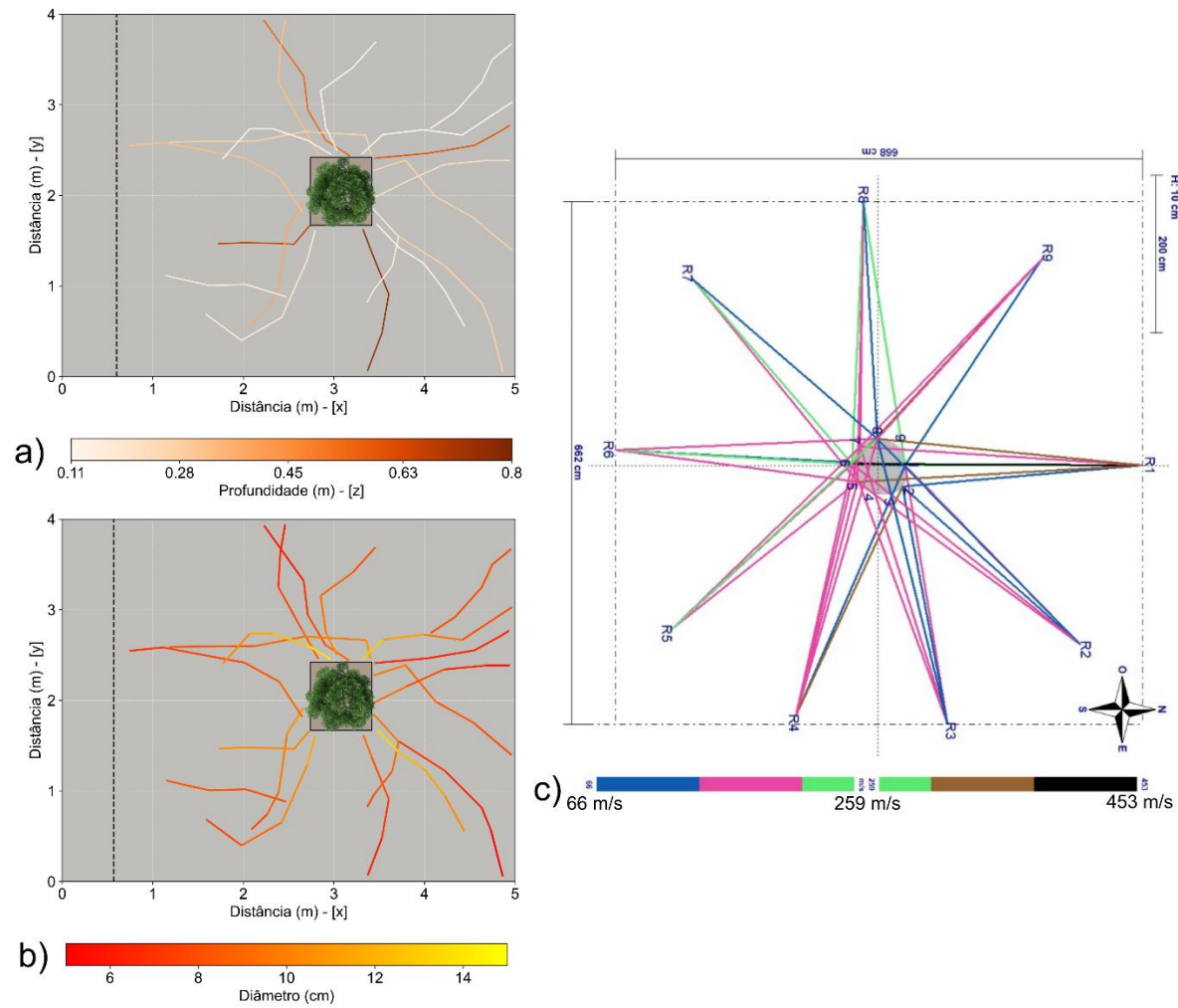


Figura 33: Resultados da análise de raízes do exemplar de abricó de macaco (AM). a) Distribuição geométrica com profundidade (método GPR). b) Distribuição geométrica com diâmetro de raízes (método GPR). c) Tomógrafo sônico de raízes (ArboRadix).

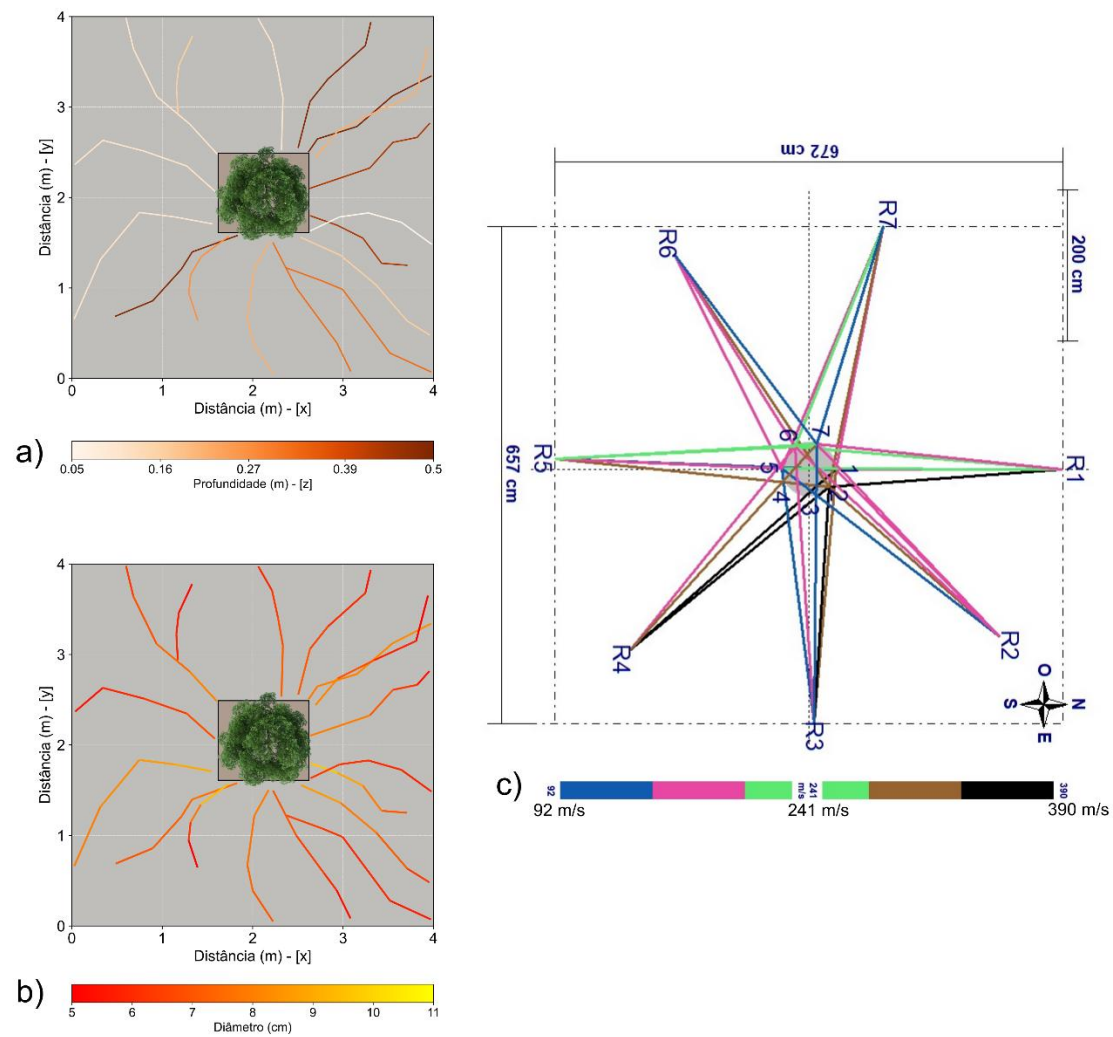


Figura 34: Resultados da análise de raízes do exemplar de seringueira (SG1). a) Distribuição geométrica com profundidade (método GPR). b) Distribuição geométrica com diâmetro de raízes (método GPR). c) Tomógrafo sônico de raízes (ArboRadix).

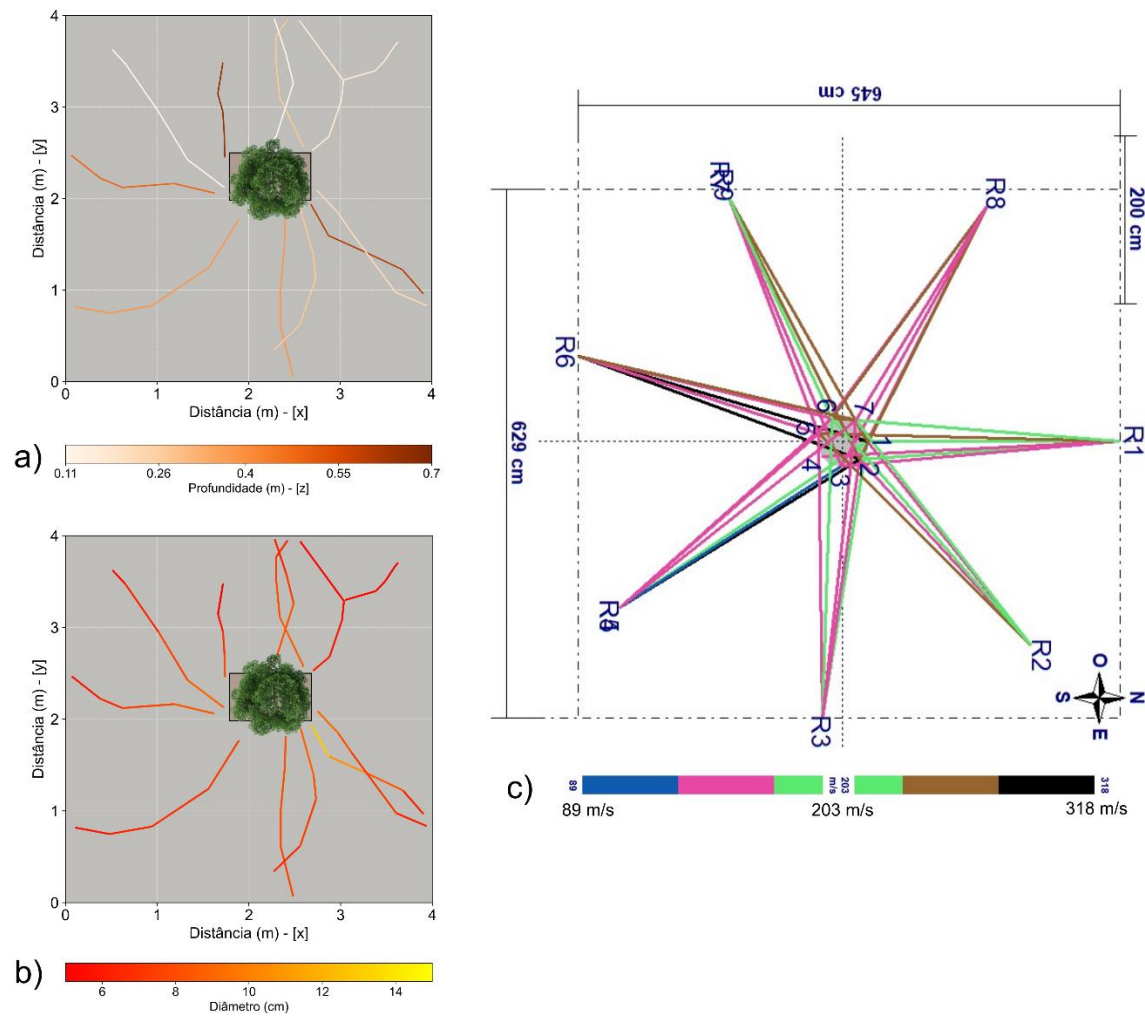


Figura 35: Resultados da análise de raízes do exemplar de seringueira (SG2). a) Distribuição geométrica com profundidade (método GPR). b) Distribuição geométrica com diâmetro de raízes (método GPR). c) Tomógrafo sônico de raízes (ArboRadix).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo comparar os métodos geofísicos GPR (*Ground Penetrating Radar*) e da eletrorresistividade com a tomografia de ondas mecânicas, além da resistografia na avaliação de troncos e raízes de árvores. Foram adquiridos dados em troncos de eucaliptos e mungubas, saudáveis e com problemas internos, com seções de tomografia, GPR e eletrorresistividade na base e na altura do DAP (1,30 m) e os resultados aferidos com o resistógrafo. Já os dados em raízes foram adquiridos em um exemplar de abricó de macaco e duas seringueiras, com dados gerados a partir do tomógrafo e GPR.

Pela análise qualitativa, não houve uma concordância entre as imagens geradas pelo tomógrafo, GPR ou eletrorresistividade, pois as seções geradas das árvores estudadas não apresentaram respostas suficientes para equivalência destas técnicas que possuem propriedades físicas diferentes, caracterizando o mesmo meio com informações diferentes. Já pela análise quantitativa, com a comparação dos valores obtidos de velocidade de propagação da onda mecânica, amplitude de reflexão do GPR e resistividade elétrica do método da eletrorresistividade, foi possível fazer uma distinção entre as espécies.

É necessário realizar mais aquisições de dados para verificar se de fato existe essa distinção entre espécies, para tentar se chegar a um padrão de valores para tipos variados de anatomia interna de troncos. Tais valores não existem na literatura, principalmente para as propriedades físicas obtidas com a geofísica. Além disso, seria necessária uma análise mais direta dos exemplares, com ensaios de laboratório da madeira das alturas analisadas. Outra propriedade de interesse neste estudo seria o teor de umidade do tronco, uma vez que a resistividade elétrica possui relação direta com este parâmetro.

Com o tomógrafo de raízes e o GPR foi possível estabelecer relações espaciais apenas, comparando a estimativa da presença da primeira metodologia, com a real posição obtida pela segunda. Os dois métodos são complementares, pois com a distribuição de velocidade é possível verificar o estado fitossanitário do sistema radicular e, por sua vez, com o georadar, pode-se determinar a localização, profundidade e diâmetro destas estruturas.

Tanto o GPR quanto a eletrorresistividade se mostraram como metodologias promissoras para a análise interna de troncos de árvores, porém, são necessários mais estudos para se encontrar padrões de anomalias para diferentes espécies. Já no mapeamento de raízes, trata-se de metodologias já consagradas, que mostram muito potencial de aplicação na arborização urbana, contudo, é preciso se obter a estimativa de sanidade destas estruturas, com mais análises e outros tipos de ferramentas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, R.C., OLIVEIRA, A.L.C., CARRASCO, E.V.M. **Propriedades físicas da madeira de Eucalyptus cloeziana F. Muell.** Floresta e Ambiente, v.24, 2017.
- AMARAL, R.D.A.M. **Diagnóstico da ocorrência de cupins xilófagos em árvores urbanas do bairro de Higienópolis, na cidade de São Paulo.** Dissertação de Mestrado defendida em Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 85p, 2002.
- ANNAN, A.P. **Ground penetration radar workshop notes.** Sensors & Software, Inc., Internal Report, 130p, 1992.
- ANNAN, A.P. **Transmission dispersion and GPR.** Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 1 (B): 125 – 136, 1996
- APAYDIN, O., ISSEVEN, T., CITIR, Y., PAKER, S., ERER, I., AYDIN, N.G. **Extracting tomographic images of interior structures of cylindrical objects and trees using Ground Penetrating Radar method.** Results in Engineering, v.14, 2022
- BALAWANT, P., JYOTHI, V., PUJARI, P.R., DHYANI, S., VERMA, P., PADMAKAR, C., QUAMAR, R., RAMESH, J., KHARE, S., MITKARI, M. **Tree root imaging by electrical resistivity tomography: geophysical tools to improve understanding of deep root structure and rhizospheric processes.** Tropical Ecology, v.63, p.319-324, 2022.
- BRAZOLIN, S. **Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP.** Tese defendida em Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 265p, 2009.
- CUNHA, V.L.C.M., MAGALHÃES, L.M.S., FREITAS, W.K., MENDONÇA, B.A.F. **Conflitos da arborização com elementos urbanos na cidade de Valença, Estado do Rio de Janeiro.** Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, v.15, n.2, p.28-41, 2020.
- DANIELS, D. J. **Ground Penetrating Radar.** Second Ed. IET Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series, Vol. 15, 2007.
- DEFLORIO, G., FINK, S., SCHWARZE, F.W.M.R. **Detection of incipient decay in tree steams with sonic tomography after wounding and fungal inoculation.** Wood Science Technology, v. 42, p.117-132, 2008.
- DIVAKARA, B.N., CHAITHRA, S. **Electric resistance tomograph (ERT): a review as non-destructive tool (NDT) in deciphering interiors of standing trees.** Sensing an Imaging, v.23, n.18, 2022.
- DUDKIEWICZ, M., DURLAK, W. **Sustainable management of very large trees with the use of acoustic tomography.** Sustainability, v.13, 2021.
- EHOSIOKE, S., NGUYEN, F., RAO, S., KREMER, T., PLACENCIA-GOMEZ, E., HUISMAN, J.A., KEMMA, A., JAVAUX, M., GARRÉ, S. **Sensing the electrical properties of roots: A review.** Vadoze Zone Journal, v.19, n.1, 2020.
- EMERICK, T.G. **Risco de queda de árvores urbanas: a associação entre os parâmetros da análise visual, tomogramas e ocorrência de queda.** Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, 135p, 2021.
- GROSTEIN, M.D. **Metrópole e expansão urbana a persistência de processos “insustentáveis”.** São Paulo em Perspectiva, v.15, n.1, p.13-19, 2001.
- GROTE, R., SAMSON, R., ALONSO, R., AMORIM, J.H., CARIÑANOS, P., CHURKINA, G., FARES, S., THIEC, D., NIINEMETS, Ü., MIKKELSEN, N., PAOLETTI, E., TIWARY, A., CALFAPEITRA, C. **Functional traits of urban**

- trees: air pollution mitigation potential.** *Frontiers in Ecology and the Environment*, v.14, n.10, p.543-550, 2016.
- GUARDIA, I. **Velocidade de onda mecânica na avaliação de raízes de ancoragem de árvores nas cidades.** Dissertação de Mestrado defendida em Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 164p, 2020.
- HU, H., FANG, H., WANG, N., LIU, H., LEI, J., MA, D., DONG, J. **A study of automatic recognition and localization of pipeline for ground penetrating radar based on deep learning.** *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v.19, 2022.
- KANTAVICHAI, R., TURNBLOM, E.C. **Identifying non-thrive trees and predicting wood density from resistograph using temporal convolution network.** *Forest Science and Technology*, 2022.
- KELLER, V. G., FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical methods in geophysical prospecting.** Oxford, Pergamon Press, 2ª ed., 517 p, 1987.
- LANGWIG, J. E.; SKAAR, C. **Electrical resistivities of 18 Venezuelan and 13 North American woods.** *Wood Science*, v. 8, n. 1, p. 350-354, 1975.
- LARSSON, B., BENGTSSON, B., GUSTAFSSON, M. **Nondestructive detection of decay in living trees.** *Tree Physiology*, n.24, 2004.
- LIN, C.-J., HUANG, Y.-H., HUANG, G.-S., WU, M.-L. **Detection of decay damage in iron-wood living trees by nondestructive techniques.** *Journal of Wood Science*, v.62, p.42-51, 2016.
- LOBÃO, M.S., LÚCIA, R.M.D., MOREIRA, M.S.S., GOMES, A. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades.** *Sociedade de Investigações Florestais*, v.28, n.6, p.889-894, 2004.
- LOKE, M. H. **Software User's Manual. Res2dInv version 3.3. for Windows 3.1 and 95 – Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method.** Penang, Malaysia, 35p, 1999.
- LUO, W., LEE, Y.H., OW, L.F., YUSOF, M.L.M., YUCEL, A.C. **Accurate tree roots positioning and sizing over undulate ground surface by common offset GPR measurements.** *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 71, 2022.
- MENDES, M.E.G. **Potencial matricial da água no solo em cultura de seringueira (Hevea brasiliensis Muell. Arg.).** Tese apresentada a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, 102p, 1990.
- OLIVEIRA, T.T. **Morfoanatomia e tecnologia para produção de mudas e indicação de uso da madeir de Pseudobombax munguba Dungad.** Dissertação de mestrado da Universidade Federal Rural da Amazônia e Museu Praense Emílio Goeldi, 80p, 2018.
- ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua.** Ed. Paraninfo, Madrid, 523p., 1972.
- PAPANDREA, S.F., CATALO, M.F., ZIMBALATTI, G., PROTO, A.R. **Comparative evaluation of inspection techniques for decay detection in urban trees.** *Sensors and Actuators: A. Physical*, v. 340, 2022.
- PEREIRA, B. **Análise dos efeitos do entorno urbano sobre o sistema radicular de árvores viárias de São Mateus do Sul – Paraná.** Trabalho de conclusão de curso do Curso Superior de Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- QUIGLEY, M. F. **Street trees and rural conspecifics: will low-lived trees reach full size in urbans conditions?** *Urban Ecosystems*, 7, 29-39, 2004.

- RAHMAN, M.A., MOSER, A., GOLD, A., RÖTZER, T., PAULEIT, S. **Vertical air temperature gradients under the shade of two contrasting urban tree species during different types of summer days.** *Science of the Total Environment*, v. 633, p.100-111, 2018.
- REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics.** John Wiley; Sons Ltd., 806p, 1997.
- RINNTECH. **Arbotom 3d tree impulse tomograph: User manual,** 2012.
- SANTOS, N.R.Z., TEIXEIRA, I.F. **Arborização de vias públicas: ambiente x vegetação,** 1ª Ed. Gráfica Editora Palloti, Porto Alegre-RS, 2001.
- SANTOS, V.R.N., CAETANO, M.F., MARTINATTI, M., PEREIRA, J.M. **Tecnologia ANDAS para mapeamento 3D do sistema radicular de árvores utilizando georadar e eletrorresistividade.** *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, v.17, n.1, p.17-36, 2022.
- SECRETARIA MUNICIPAL DO VERDE E DO MEIO AMBIENTE **Manual Técnico de Arborização Urbana.** 124p, 2015.
- SMULSKI, S.J. **Relationship of stress wave and static bending determined properties of four northeastern hardwoods.** *Wood and Fiber Science*, v.23, n. 1, p.44-57, 1991.
- SOCCO, L.V., SAMBUELLI, L., MARTINIS, R., COMINO, E., NICOLOTTI, G. **Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees.** *Research in Nondestructive Evaluations*, v.15, p.31-54, 2004.
- SOLLA, M., BLÁZQUEZ, C.S., NIETO, I.M., RODRÍGUEZ, J.L., MATÉ-GONZÁLEZ, M.A. **GPR application on geothermal studies: the case study of the thermal baths of San Xusto (Pontevedra, Spain).** *Remote Sensing*, v.14, 2022.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics.** Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p, 1990.
- TODO, C., YAMASE, K., IKENO, H., TANIKAWA, T., OHASHI, M., HIRANO, Y. **Maximum Rooting Depth of *Pinus thunbergii* Parl. Estimated with Depth at the Center Point of Rotation in a Tree-Pulling Experiment in a Coastal Forest in Japan.** *Forests*, v. 13, 2022.
- VENKATESWARAN, A. **A comparison of the electrical properties of milled wood, milled wood cellulose, and milled wood lignin.** *Wood Science*, v.4, n.4, p.248-253, 1972.
- VERMAAS, H. F. **DC resistance moisture meters for wood. III. Temperature correction of moisture meter readings for a proposed new moisture meter (calibrated for 20 degrees Celsius) for *Pinus pinaster* and *Pinus radiata* and calibration equations for a commercial moisture meter.** *South African forestry journal. Suid-Afrikaanse bosboutydskrif*, 1982.
- VOGT, J., GILLNER, S., HOFMANN, M., THARANG, A., DETTMANN, S., GERSTENBERG, T., SCHMIDT, C., GEBAUER, H., VAN DER RIET, K., BERGER, U., ROLOFF, A. **Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate.** *Landscape and Urban Planning*, 157, 14-25, 2017.
- WARD, S. H., HOHMANN, G. W. **Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics.** Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, ed. Misac N. Nabighian, v.1, p.131-311, 1987.

Sites visitados:

Portal Embrapa. <https://www.embrapa.br/agrossilvipastoril/sitio-tecnologico/trilha-ecologica/especies/seringueira#:~:text=Texto%20geral%20da%20esp%C3%A9cie%3A%20Planta,natural%20e%20de%20alburno%20indistinto.>

Acessado 20/09/2022

ANEXO A

Cortes em profundidade dos dados GPR obtidos no abricó de macaco (AM) e seringueiras (SG1 e SG2).

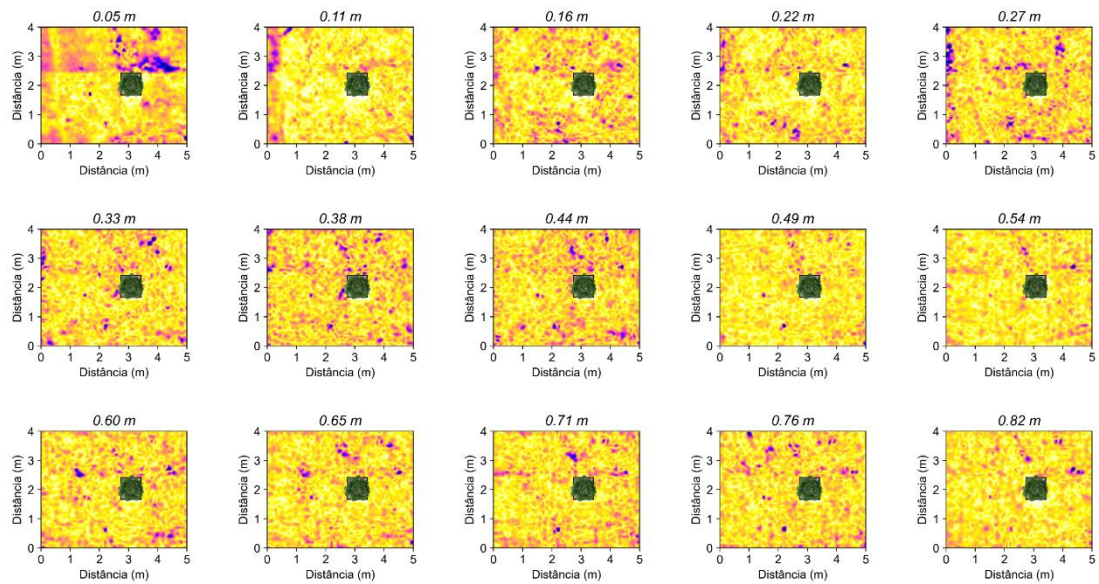


Figura A1: Cortes em profundidade dos dados GPR para o exemplar de abricó de macaco (AM).

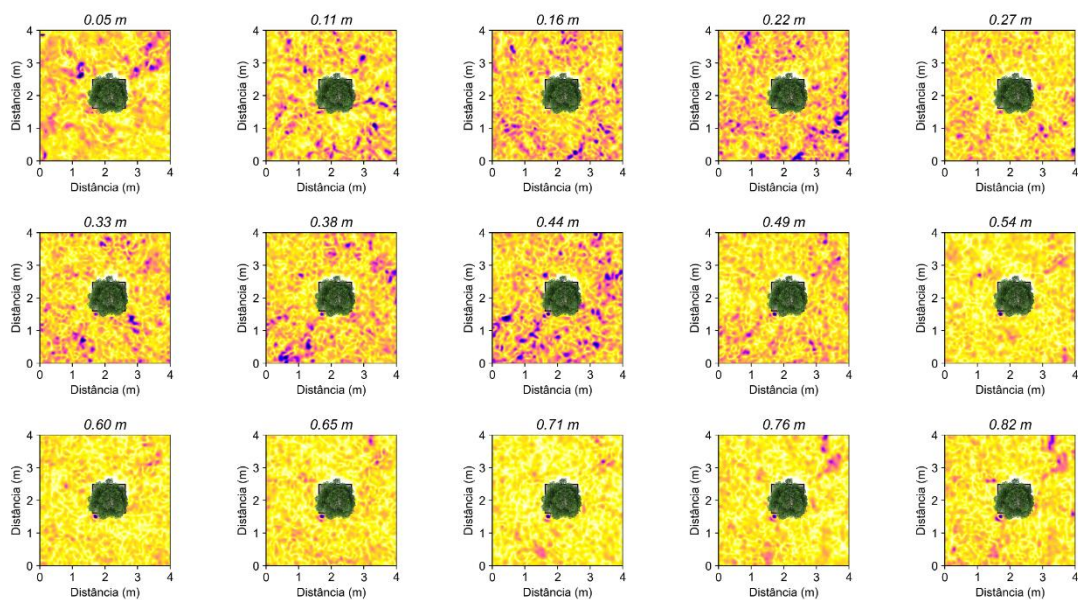


Figura A2: Cortes em profundidade dos dados GPR para o exemplar de seringueira (SG1).

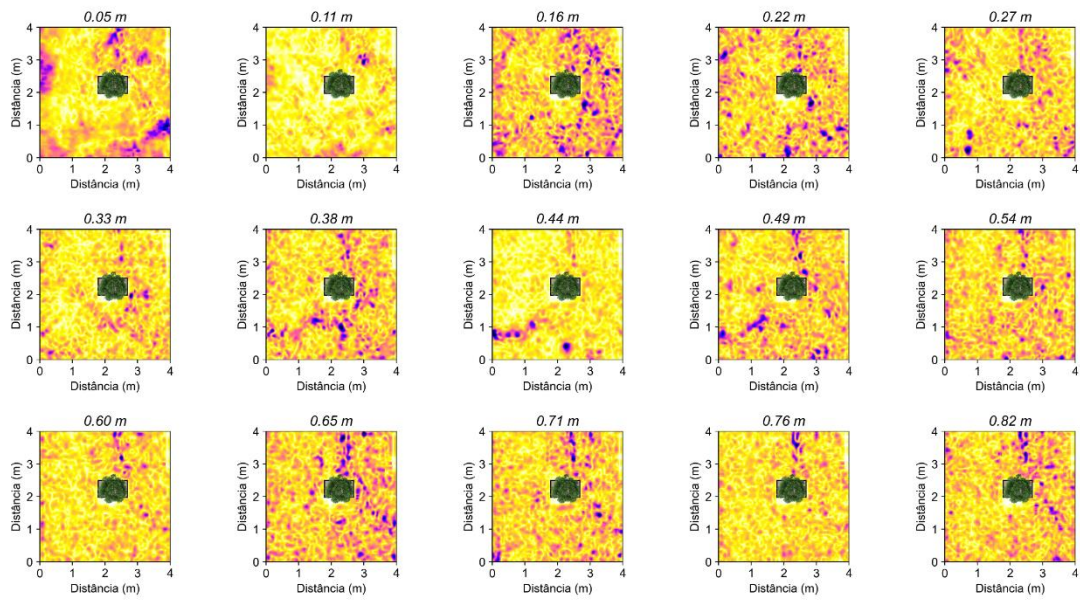


Figura A3: Cortes em profundidade dos dados GPR para o exemplar de seringueira (SG2).