

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**Método computacional para aproximação do  
diâmetro à altura do peito de árvores de  
regiões de mangue via escaneamento  
tridimensional a laser**

**Gisele Goulart Tavares da Silva**

JUIZ DE FORA  
NOVEMBRO, 2017

# Método computacional para aproximação do diâmetro à altura do peito de árvores de regiões de mangue via escaneamento tridimensional a laser

GISELE GOULART TAVARES DA SILVA

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação  
Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Priscila Vanessa Zabala Capriles Goliatt

Coorientador: Leonardo Goliatt da Fonseca

JUIZ DE FORA  
NOVEMBRO, 2017

MÉTODO COMPUTACIONAL PARA APROXIMAÇÃO DO  
DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO DE ÁRVORES DE REGIÕES  
DE MANGUE VIA ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL A  
LASER

Gisele Goulart Tavares da Silva

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS  
EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTE-  
GRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Priscila Vanessa Zabala Capriles Goliatt  
Doutora em Modelagem Computacional

Leonardo Goliatt da Fonseca  
Doutor em Modelagem Computacional

Flávia de Souza Bastos  
Doutora em Engenharia Mecânica

Luciana Conceição Dias Campos  
Doutora em Engenharia Elétrica

JUIZ DE FORA  
22 DE NOVEMBRO, 2017

*Aos meus familiares e amigos.  
Aos pais, pelo apoio e sustento.*

## Resumo

Os manguezais estão entre os ecossistemas com maior potencial para armazenamento de carbono por  $m^2$  e quantificá-lo por meio da determinação da biomassa é importante para estabelecer o potencial de sequestro de carbono de uma determinada floresta. Os métodos de determinação de biomassa consistem em trabalho de campo intensivo e dispendioso, sendo os manguezais biomas que apresentam desafios por conta da adaptação das árvores à salinidade e dificuldades de acesso. Nesse contexto, equipamentos de escaneamento a laser podem ser usados para a determinação da biomassa de florestas e diversos estudos ressaltam sua viabilidade. Porém, as nuvens de pontos tridimensionais obtidas através desses aparelhos, não fornecem informações estruturais diretamente, sendo necessário o estudo de métodos computacionais para sua determinação. Nesse trabalho é proposta a utilização de modelos computacionais para o cálculo do diâmetro à altura do peito (DAP) de troncos de árvores de florestas de mangue. A partir da nuvem de pontos obtida através de equipamento de escaneamento tridimensional, a seção transversal de cada árvore foi modelada com círculo, elipse e *spline* e seu diâmetro calculado em seguida. Para a verificação dos resultados retornados pelo algoritmo desenvolvido, dados de DAP obtidos em campo experimentalmente foram utilizados, possibilitando avaliar o desempenho do método. As medidas de precisão calculadas indicaram ajustes satisfatórios, de forma que o método proposto aproximou a geometria das árvores e pode vir a ser utilizado para auxílio em pesquisas de campo.

**Palavras-chave:** Inventário florestal, Escaneamento a laser, DAP, Manguezal, *Spline*.

## Agradecimentos

A Deus por me conceder forças em toda a caminhada. Aos meus pais Jorge e Cleonice, meu irmão Gabriel e meu namorado Leandro pela paciência e apoio durante toda a jornada. A todos os meus amigos e familiares, pelo encorajamento.

Aos professores Leonardo Goliatt e Priscila Capriles pela orientação, amizade, incentivo e principalmente, pela paciência, sem a qual este trabalho não se realizaria. Ao professor Filipe Chaves pelo auxílio durante o desenvolvimento do projeto. À professora Flávia Bastos pela presença constante em todo o percurso e à professora Luciana Campos pelas contribuições na avaliação do trabalho.

Aos professores do Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional e do Departamento de Ciência da Computação pelos seus ensinamentos e aos funcionários do curso, que durante esses anos, contribuíram de algum modo para o meu enriquecimento pessoal e profissional.

*"I believe that the scientific knowledge has fractal properties. It doesn't matter how much do we learn; the remaining, for small that could seem, is so infinitely complex as the whole from which we depart. That one, I believe, is the secret of the universe."*

*Isaac Asimov*

# Conteúdo

<b>Lista de Figuras</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Abreviações</b>	<b>8</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>9</b>
1.1 Apresentação do tema e contextualização do problema . . . . .	9
1.2 Justificativa . . . . .	11
1.3 Objetivos gerais e específicos . . . . .	12
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>13</b>
2.1 Métodos Tradicionais . . . . .	13
2.2 Uso de Escaneamento a Laser em Florestas . . . . .	14
2.3 Segmentação e Retirada de Ruído . . . . .	16
2.4 Métodos Computacionais . . . . .	18
2.4.1 Aprendizado de Máquina . . . . .	19
2.4.2 Métodos Iterativos . . . . .	19
2.4.3 Métodos Geométricos . . . . .	20
<b>3 Métodos e Resultados</b>	<b>24</b>
3.1 Aquisição dos dados . . . . .	24
3.2 Implementação e Resultados Computacionais . . . . .	24
<b>4 Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>43</b>
4.1 Trabalhos Futuros . . . . .	44
<b>Bibliografia</b>	<b>45</b>

## Lista de Figuras

1.1	Manguezal e nuvem de pontos capturada pelo equipamento de escaneamento a laser. . . . .	10
2.1	Representação do cone projetado para descrever a relação entre a altura da superfície e a distância ao <i>scanner</i> . . . . .	16
3.1	Manguezal, nuvem de pontos e árvore segmentada. . . . .	27
3.2	Fluxo de dados na realização de estudos em ecologia envolvendo métodos computacionais. Destacado na figura encontra-se a etapa de contribuição deste trabalho no estudo de métodos computacionais para extração de parâmetros de interesse a partir de nuvens de pontos de florestas. . . . .	27
3.3	Visão geral da região de estudo. . . . .	28
3.4	Comparação do número de leituras (1 leitura na extrema esquerda até 6 leituras na extrema direita) realizadas no indivíduo 7 da RBG. Conforme o aumento das cenas é possível ver de maneira mais detalhada a estrutura da árvore, com nuvens de pontos com estrutura bastante semelhante para 4, 5 e 6 leituras. . . . .	29
3.5	Comparação do número de leituras (1 leitura na extrema esquerda até 6 leituras na extrema direita) realizadas no indivíduo 7 da RBG. Conforme o aumento das cenas é possível ver de maneira mais detalhada a estrutura da árvore, com nuvens de pontos visualmente semelhantes para 4, 5 e 6 leituras. . . . .	30
3.6	Comparação dos ajustes para o indivíduo 22. Os três métodos apresentam comportamentos semelhantes na maior parte das leituras por conta da qualidade dos dados ser suficiente para as aproximações. . . . .	33
3.7	Comparação dos ajustes para o indivíduo 11. Os três métodos apresentam comportamentos semelhantes na maior parte das leituras por conta da qualidade dos dados ser suficiente para as aproximações. . . . .	34
3.8	Comparação dos ajustes para o indivíduo 30. É possível notar que a <i>spline</i> apresentou comportamento insatisfatório em 1, 2 e 3 leituras, com altos valores de erro. Isso ocorreu por conta do método considerar os dados utilizados insuficientes para os ajustes. . . . .	35
3.9	Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de círculos para aproximação do DAP para cada uma das árvores. . . . .	38
3.10	Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de elipses para aproximação do DAP para cada uma das árvores. . . . .	39
3.11	Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de <i>splines</i> para aproximação do DAP para cada uma das árvores. . . . .	40

## Lista de Tabelas

3.1	Especificações técnicas do FARO Laser Scanner Focus 3D . . . . .	30
3.2	Relação das espécies estudadas . . . . .	31
3.3	Resultados das aproximações em 2 leituras com o uso de círculos, elipses e <i>splines</i> do DAP em centímetros dos indivíduos da RBG. Ao lado são apresentados os valores de erro percentual em relação ao valor real. Em algumas árvores os erros para os ajustes da <i>spline</i> foram altos por conta dados serem insuficientes ou formarem uma figura desconexa. . . . .	36
3.4	Resultados das aproximações em 6 leituras com o uso de círculos, elipses e <i>splines</i> do DAP em centímetros dos indivíduos da RBG. Ao lado são apresentados os valores de erro percentual em relação ao valor real. . . . .	37
3.5	Medidas de precisão de 1 a 6 leituras para cada um dos métodos. Os valores foram calculados utilizando os resultados aproximados pelo algoritmo e os valores reais obtidos em campo . . . . .	37

## Lista de Abreviações

DAP	Diâmetro à altura do peito
OSM	Modo de escaneamento único, do inglês <i>One-scan-mode</i>
MSM	Modo de escaneamento múltiplo, do inglês <i>Multi-scan-mode</i>
LiDAR	Detecção e variação de luz, do inglês <i>Light detection and ranging</i>
DBSCAN	Agrupamento espacial baseado em densidade de aplicações com ruído, do inglês <i>Density-based spatial clustering of applications with noise</i>
ER	Erro relativo
RQEM	Raiz quadrada do erro quadrático médio
MDA	Média das diferenças absolutas
$R_{y\hat{y}}$	Coefficiente de correlação
GPS	Sistema de posicionamento global, do inglês <i>Global positioning system</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
RGB	Vermelho-verde-azul, do inglês <i>Red-green-blue</i>
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
TLS	Escaneamento terrestre a laser, do inglês, <i>Terrestrial laser scanning</i>

# 1 Introdução

Práticas que envolvam a melhoria das condições climáticas e da qualidade do ar são bem vistas diante do progressivo aumento das taxas de misturas de poluentes emitidas constantemente (KIM et al., 2007). As impurezas encontradas no ar estão alcançando níveis preocupantes, podendo acarretar problemas respiratórios para a população (GOUVEIA et al., 2006). Além disso, altas concentrações de poluentes como por exemplo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera, contribuem para o aumento da temperatura no planeta. As árvores desempenham um papel importante no ciclo de carbono e são importantes agentes responsáveis pela melhora da qualidade do ar. Neste contexto, o estudo e controle de áreas florestais torna-se cada dia mais necessário a fim de monitorar áreas com grande potencial de absorção de dióxido de carbono.

## 1.1 Apresentação do tema e contextualização do problema

Para a análise de uma floresta é elaborado um inventário florestal, documento responsável por avaliar e caracterizar de forma qualitativa e quantitativa a região. Nele constam informações sobre espécie, volume de madeira, diâmetro à altura do peito (DAP), que fica a aproximadamente 1,30 m do solo, e altura (SEGURA; KANNINEN, 2005; MERCKER; HENNING, 2011). O DAP fornece informações sobre a idade das árvores e seu desenvolvimento ao longo dos anos.

O inventário florestal avalia a disponibilidade dos recursos florestais e realiza o monitoramento de seu uso. Este documento pode mensurar também o volume de madeira comercial e o impacto da derrubada de árvores para o ecossistema. No Brasil o inventário florestal contínuo ainda é uma das formas de inventário mais utilizadas. Nele são utilizadas parcelas permanentes que são instaladas quando os povoamentos atingem 2 ou 3 anos, que são remedidas em períodos que variam de um a dois anos (OLIVEIRA, 2006).

O LiDAR, Detecção e variação de luz, do inglês *Light Detection and Ranging* é uma técnica de varredura, rastreamento e perfilamento a laser. Uma aplicação comum do LiDAR é nos aparelhos de escaneamento tridimensional (WULDER et al., 2012). A tecnologia de escaneamento tridimensional permite mapear uma área grande de floresta em questão de horas. O resultado do mapeamento é uma nuvem de pontos tridimensional que representa com precisão a área escaneada. Porém, mesmo com a precisão dos escâneres atuais, o resultado do processo continua sendo uma nuvem de pontos desconexa, sem informação estrutural ou identificação dos objetos escaneados. Um exemplo de um trecho de floresta obtido através de um equipamento de escaneamento terrestre a laser é mostrado na Figura 1.1.

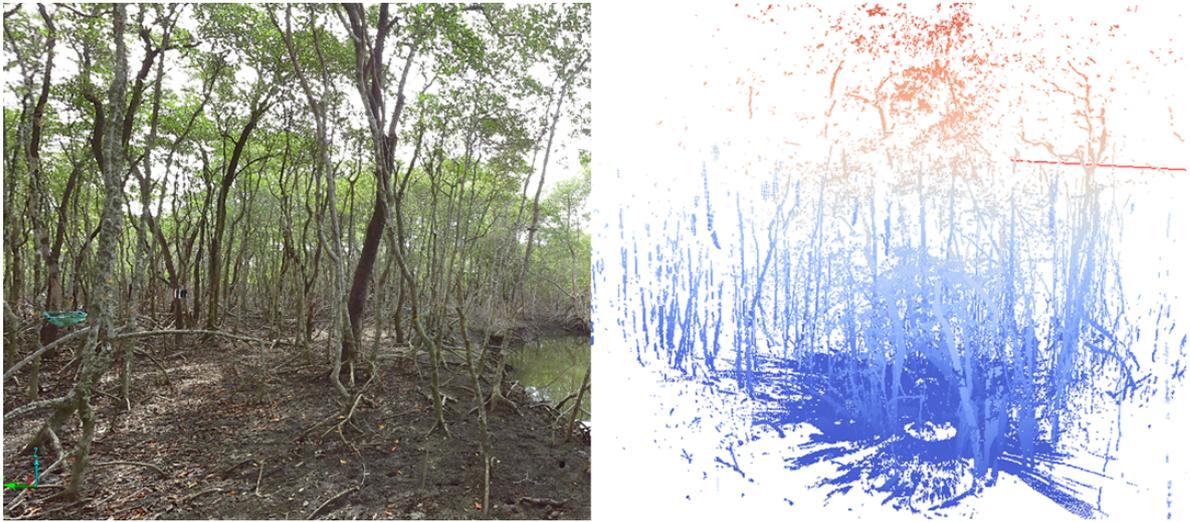


Figura 1.1: Manguezal e nuvem de pontos capturada pelo equipamento de escaneamento a laser.

O estudo de técnicas para facilitar e automatizar a aquisição dos parâmetros estruturais florestais vêm crescendo ao longo dos anos (PFEIFER et al., 2004; LIANG et al., 2012; FELICIANO; WDOWINSKI; POTTS, 2014). Hackenberg et al. (2015) desenvolveu uma ferramenta chamada *SimpleTree* capaz de modelar árvores de forma acurada através de nuvens de pontos obtidas via escaneamento terrestre a laser. O método foi validado utilizando coníferas, apresentando bons resultados em comparação aos dados experimentais. Porém, alguns biomas podem apresentar desafios em relação às aproximações com uso de laser terrestre por conta das diferentes características morfométricas das árvores.

A determinação dos parâmetros florestais vêm sendo realizada com o uso dos

métodos tradicionais, divididos em diretos e indiretos (PARDE et al., 1980 apud TRAUTENMÜLLER, 2015): (i) os métodos diretos, também chamados de destrutivos, necessitam da derrubada de uma parcela de árvores da região para a secagem e pesagem da madeira; (ii) nos métodos não destrutivos, ou indiretos, os pesquisadores se deslocam até a área monitorada para a medição dos parâmetros estruturais através de fitas métricas e equipamentos próprios para estudos dendrométricos. A estimativa da biomassa é realizada através de modelos que resolvem equações alométricas<sup>1</sup>, que relacionam forma e tamanho das árvores e visam extrapolar a biomassa de uma grande área de floresta.

Os métodos tradicionais demandam de equipe bem treinada para sua aplicação, necessitando de trabalho intensivo e custoso. Além disso, os parâmetros estruturais utilizados nas equações alométricas estão sujeitos a erros de medição que variam entre 10% e 15% (CHAVE et al., 2005). Outro agravante é que os modelos alométricos tendem a ser desenvolvidos para uma região específica, de forma que reduzir o custo da obtenção de tais modelos é de grande importância para que mais florestas possam ser estudadas.

## 1.2 Justificativa

O gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, e a diminuição de suas concentrações na atmosfera representa um impacto direto em estudos sobre sequestro de carbono. O termo sequestro de carbono se refere à captura e armazenamento a longo prazo de  $\text{CO}_2$  da atmosfera, surgindo como uma estratégia importante para abordar as preocupações relacionadas a mudanças climáticas (NOWAK; CRANE, 2002), sendo determinada através de inventários florestais. A biomassa é um importante parâmetro em estudos sobre o comportamento do ciclo do carbono por conta da capacidade natural dos vegetais de absorver  $\text{CO}_2$ , fixá-lo na forma de carbono na matéria lenhosa e liberar gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ) na atmosfera, por meio da fotossíntese.

Os manguezais vêm ganhando destaque em estudos florestais por conta de seu alto grau de absorção de  $\text{CO}_2$  em biomassa (DONATO et al., 2011). Estão distribuídos amplamente na superfície terrestre, e apresentam desafios em relação à aquisição dos

---

<sup>1</sup>Equações alométricas são modelos matemáticos obtidos através do estudo da relação entre forma e tamanho das árvores.

parâmetros estruturais. Grande parte das árvores são tortuosas e possuem raízes aéreas por conta da adaptação dos indivíduos a alta salinidade e do efeito das marés, com áreas por vezes alagadas, dificultando o acesso e apresentando riscos aos pesquisadores.

As tecnologias de escaneamento tridimensional a laser têm sido utilizadas para aquisição de dados de florestas, e métodos vêm sendo estudados para a aproximação dos parâmetros florestais. Porém, a maior parte dos estudos envolvem árvores com características regulares, como Pinus (TAHVANAINEN; FORSS, 2008; WANG et al., 2017), e pesquisas envolvendo mangues são relativamente recentes (FELICIANO; WDOWINSKI; POTTS, 2014). Aproximações em dados provenientes de manguezais tendem a ser computacionalmente mais custosas devido à não uniformidade no formato das árvores, incentivando o intenso estudo de métodos para o ajuste dos parâmetros estruturais deste ecossistema.

### 1.3 Objetivos gerais e específicos

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver modelos computacionais para a estimativa do diâmetro à altura do peito, de árvores de mangue, a partir de dados de escaneamento tridimensional a laser.

Os objetivos específicos que se destacam no trabalho são:

- estudar métodos aplicados ao ajuste de parâmetros estruturais de florestas;
- desenvolver algoritmos para aproximação de modelos geométricos e de interpolação em dados de escaneamento tridimensional a laser;
- verificar e validar o ajuste dos modelos em dados de manguezal com o uso de medições realizadas em campo;
- avaliar a viabilidade da aplicação do método computacional para aproximação de parâmetros estruturais de árvores de mangue através de dados de escaneamento;

## 2 Revisão Bibliográfica

Grande parte da biomassa existente no planeta está localizada nas florestas, sendo de suma importância a formação de ecologistas capacitados a aplicar métodos que visem quantificar este parâmetro (SANQUETTA, 2002 apud NICOLETTI, 2011). Os inventários florestais são documentos responsáveis por avaliar uma floresta de forma qualitativa e quantitativa com o uso dos parâmetros estruturais, como por exemplo biomassa, diâmetro à altura do peito (DAP), altura da árvore e área de sombra, utilizados para a tomada de decisões mais precisas e melhor planejamento das atividades em relação à área.

### 2.1 Métodos Tradicionais

Caldeira (2003) cita que quantificar a biomassa pode fornecer importantes informações sobre a magnitude e distribuição dos produtos de uma floresta que não ficam claras nos tradicionais mapas florestais. Seu estudo também é importante para tomar conhecimento do crescimento e produtividade em ecossistemas florestais e planejar seu manejo de forma sustentável (VOGEL; SCHUMACHER; TRÜBY, 2013).

A estimativa da biomassa é feita principalmente através de dois métodos: direto e indireto. Nos métodos diretos, também chamados de destrutivos, é realizado o abate do indivíduo de diâmetro médio do povoamento quando se trata do método da árvore individual e procede-se com a derrubada de todas as árvores de determinada área amostral quando o método da parcela é empregado. Em ambos os casos são realizadas medições diretas do peso da massa biológica fresca e seca, e modelos que extrapolam a biomassa da região são aproximados (PARDE et al., 1980 apud TRAUTENMÜLLER, 2015).

Nos métodos indiretos, conhecidos como não-destrutivos, são utilizados dados de inventário florestal para aproximar o a biomassa florestal através do volume. Estes parâmetros estruturais são obtidos através de medidas realizadas diretamente na área de estudo. As equações alométricas que são ajustadas através de técnicas de regressão e utilizam apenas o DAP são indicadas para modelagem de florestas locais, mas podem

ter maior grau de incerteza nos modelos matemáticos mais complexos. A estimativa da biomassa pode ser melhorada através da inclusão da altura total da árvore no ajuste dos modelos alométricos (SILVEIRA et al., 2008).

Ambos os métodos necessitam de trabalho árduo para a aquisição dos parâmetros florestais, mas a abordagem direta pode ser inviável para aplicação em grandes áreas devido ao alto tempo e custo empregados. O uso de equações alométricas apresenta vantagens devido a não necessidade do cálculo da variável volume, mas a desvantagem de nem sempre possuir o número adequado de amostras para a modelagem (SANQUETTA et al., 2014) . Alguns locais podem ser de difícil acesso, dificultando ainda mais a aplicação dos métodos tradicionais.

## 2.2 Uso de Escaneamento a Laser em Florestas

O escaneamento de florestas pode se tornar uma tarefa difícil quando o equipamento inadequado está sendo utilizado, de maneira que a escolha do *scanner* se torna uma importante etapa neste tipo de trabalho. Maas et al. (2008) realizaram um estudo onde o objetivo principal foi validar e verificar a precisão e viabilidade do uso de dados provenientes de escaneamento tridimensional a laser para aplicações relacionadas a inventários florestais. Para isso, utilizou 5 estudos referência que tratam de diferentes tipos de florestas, *scanners* e modos de escaneamento para testar o potencial de automatização no processamento de dados.

Os equipamentos de escaneamento tridimensional geram densas nuvens de pontos que representam o objeto escaneado, sendo consideradas tanto produto final quando base na geração de dados de entrada para produtos de *software* (MAAS et al., 2008). Os instrumentos de escaneamento a laser podem ser categorizados de acordo com três critérios: precisão, deflexão e campo de visão. A precisão se encontra usualmente de 5-10 mm, mas alguns equipamentos utilizam técnicas de modulação de fase para alcançar valores entre 1-3 mm. Os *scanners* realizam a leitura da superfície do objeto sequencialmente em duas direções, com a imagem defletida por espelhos galvanométricos, RODAS poligonais, espelhos elípticos rotacionados ou pela combinação deles. Grande parte dos instrumentos que utilizam tecnologia baseada laser oferecem campo de visão panorâmico horizontal de

360° e ângulo vertical entre 80° e 135°.

Os equipamentos a serem utilizados em aplicações típicas de inventários florestais devem ter um alcance máximo de pelo menos 50 m para realizar varreduras em áreas com raio de 12-15 m e árvores de até 40 m de altura. A aquisição de dados deve ser de pelo menos 10000 pontos por segundo para garantir um tempo eficiente de operação. A precisão deve ser melhor do que 10 mm para possibilitar a determinação adequada de diâmetros ao longo do tronco (MAAS et al., 2008).

A obtenção de parâmetros estruturais através dos métodos tradicionais é custosa, de forma que o uso técnicas de escaneamento tridimensional a laser oferece novas possibilidades em relação à sua aquisição rápida e automática (LIANG et al., 2008). Dois tipos principais de escaneamento tridimensional são mencionados por Liang et al. (2008): modo de escaneamento múltiplo, do inglês *multi-scan-mode* (MSM) e modo de escaneamento único, do inglês *one-scan-mode* (OSM). No MSM o aparelho é normalmente posicionado fora da área estudada e múltiplas leituras são realizadas em torno e sobrepostas, oferecendo imagens tridimensionais completas dos indivíduos. No OSM o *scanner* é disposto no meio da região analisada, realizando uma varredura completa em torno de seu eixo. O uso de MSM oferece mais dados em relação ao formato das árvores, mas exige um tempo maior para a aquisição do conjunto de dados e por consequência causa um aumento no custo. Por este motivo, o estudo de dados derivados de OSM se mostra importante para determinar sua viabilidade em prover informações de uma floresta, reduzindo os trabalhos em campo.

Em Liang et al. (2012), o Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) é empregado para o cálculo aproximado da localização da árvore dentro da área de estudo através de suas coordenadas. Uma abordagem que aproxima autovalores e autovetores é utilizada para estudar a distribuição dos pontos e detectar os troncos. Esse processo retorna uma nuvem tridimensional de pontos onde, apesar da variedade de espécies, são aproximados círculos horizontais e cilindros verticais que têm sido geralmente utilizados.

## 2.3 Segmentação e Retirada de Ruído

Simonse et al. (2003) determinam o Modelo Digital do Terreno (MDT) testando os pontos para a exclusão através de um cone em torno do *scanner* a partir do fornecimento do ângulo  $\alpha$  responsável por determinar a prioridade da informação de altura máxima do terreno, como exemplificado na Figura 2.1. De acordo com a posição do *scanner*, um cone que descreve a relação entre a altura da superfície e a distância ao aparelho é projetado e as coordenadas que se encontram dentro do cone são ignoradas. Após este processo, pontos que claramente não fazem parte da superfície do terreno são retirados manualmente.

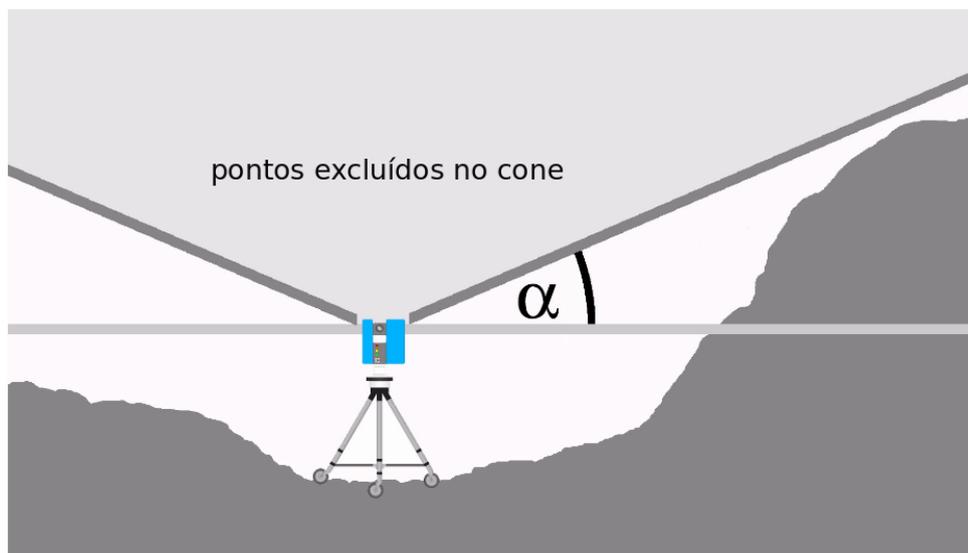


Figura 2.1: Representação do cone projetado para descrever a relação entre a a altura da superfície e a distância ao *scanner*.

Fonte: Adaptado de Simonse et al. (2003).

Antes da aplicação dos algoritmos para ajuste dos parâmetros de inventário, um filtro deve ser utilizado para a retirada de pontos de ruído, pois o *scanner* realiza a aquisição de uma ampla quantidade de dados que nem sempre fazem parte da estrutura das árvores. A primeira técnica utilizada por Simonse et al. (2003) consiste na exclusão de pontos isolados através da análise das distâncias dos pixels<sup>2</sup> vizinhos, enquanto a segunda utiliza a intensidade de reflexão como parâmetro para a detecção de ruído. Como a intensidade varia de 0 a 32767 e objetos naturais não possuem altos valores para intensidade,

<sup>2</sup>Um pixel (abreviatura do inglês, *picture element*) é um dos milhares de minúsculos pontos que aparecem no quadriculado de uma tela ou folha impressa. Estes pontos têm cada um sua cor para mostrar imagens em telas, e representam os menores elementos que podem ser manipulados para gerar gráficos.

a localização de ruído pode ser realizada com ambos os métodos de modo que a maior parte desses pontos é deletada do conjunto de dados.

A fim de reduzir a complexidade computacional, os pontos provenientes de escaneamento são mapeados em uma malha 2D retangular para a aplicação da Transformada de Hough. Este método utiliza uma descrição paramétrica para a detecção de formas geométricas simples, como retas, círculos e elipses em imagens digitalizadas (SIMONSE et al., 2003). A Transformada de Hough necessita da entrada de um valor de diâmetro antes de reconhecer um círculo. Como o diâmetro da árvore não é conhecido antes da aplicação do algoritmo, Simonse et al. (2003) começaram com 100 cm e foram reduzindo este valor em incrementos de 10 cm. Nos pontos selecionados um algoritmo algébrico foi utilizado para ajustar precisamente um círculo.

Informações referentes ao sistema RGB de cores podem ser adicionadas aos dados tridimensionais. Com isso, outros métodos que facilitem a determinação de parâmetros de inventários florestais, como a identificação de defeitos nos troncos e distribuição da biomassa, podem ser estudados futuramente. Uma das vantagens do uso de técnicas de sensoriamento remoto é seu alto grau de automatismo, de modo que resultados podem ser reproduzidos em diferentes momentos (SIMONSE et al., 2003).

Segundo Pfeifer et al. (2004), o algoritmo necessita de um ponto de partida, de modo que todos os dados de entrada devem pertencer ao mesmo cilindro. A nuvem de pontos retornada pelo *scanner* apresenta pontos pertencentes a toda área onde a varredura foi realizada, não sendo possível a retirada de informações estruturais diretas ou distinção das árvores. O processo de segmentação, ou seja, a separação dos indivíduos dentro do grande conjunto de pontos pode ser realizado manualmente, mas também pode ser automatizado. Gorte e Pfeifer (2004) descrevem um método que transforma a nuvem de pontos em um espaço de voxel<sup>3</sup>, preenchendo os espaços vazios entre os galhos com morfologia matemática e esqueletizando a árvore. Cada esqueleto de voxel pertence a uma curva 3D, permitindo que a nuvem de pontos original possa ser segmentada de acordo com a distâncias entre estas curvas no espaço de voxel.

Para a extração de parâmetros florestais a partir de nuvens de pontos tridimen-

---

<sup>3</sup>Em uma representação tridimensional de um conjunto de dados cada elemento básico é chamado de voxel (elemento de volume) e possui o mesmo tamanho em todas as dimensões.

sionais, a filtragem para retirada de pontos isolados se torna importante para evitar erros nas aproximações. Cada ponto incorreto é encontrado através da análise da vizinhança, testando o ângulo entre a direção do *scanner* e alguns pontos considerados como vizinhos. Assim como Simonse et al. (2003), Aschoff, Thies e Spiecker (2004) determinam o MDT, que visa isolar os principais objetos de estudos florestais: terreno e árvores. Após a retirada do MDT, os dados acima do solo são cortados a diferentes alturas e projetados em planos bidimensionais. Métodos de análise de imagens são utilizados para determinar a posição das árvores e os diâmetros nos planos determinados anteriormente.

A área estudada deve ser representada de maneira adequada para o eficiente ajuste dos parâmetros de inventário florestal. Para isso, Aschoff, Thies e Spiecker (2004) posicionam o equipamento responsável pelo escaneamento em quatro posições igualmente distribuídas em torno da área estudada, de forma que esta seja caracterizada de maneira correta. Rótulos foram utilizados nas árvores e no solo para facilitar a união dos diferentes escaneamentos e para orientar as nuvens de pontos em um sistema referencial de coordenadas. Os rótulos foram posicionados em locais visíveis na maior parte dos escaneamentos.

## 2.4 Métodos Computacionais

Novas técnicas para obtenção dos parâmetros estruturais vêm sendo estudadas por diversos pesquisadores, como Seidel et al. (2011), Liang et al. (2012), Feliciano, Wdowinski e Potts (2014), Åkerblom et al. (2015), Hackenberg et al. (2015), entre outros. A utilização de *scanner* terrestre é proposta para obtenção dos dados tridimensionais por Maas et al. (2008), Liang et al. (2012) e Feliciano, Wdowinski e Potts (2014) e tem se mostrado promissora por conta da praticidade no mapeamento de florestas. Métodos computacionais têm sido estudados para o tratamento dos dados provenientes de escaneamento a laser, com o objetivo de realizar aproximações de informações estruturais de forma acurada.

### 2.4.1 Aprendizado de Máquina

Elementos mais complexos do que cilindros circulares foram utilizados em modelos similares propostos por Åkerblom et al. (2015), mas os resultados mostraram que a utilização de geometrias mais simples pode produzir resultados com elevada precisão. Métodos de classificação como k-vizinhos mais próximos, regressão multinomial e abordagens baseadas em máquinas de vetores suporte foram utilizados por Åkerblom et al. (2017) para agrupar as árvores em 3 espécies de acordo com suas características. Um conjunto de treinamento ou um modelo derivado dele é utilizado, de forma que os métodos de classificação são capazes de calcular as probabilidades dos elementos pertencerem a cada espécie. Åkerblom et al. (2017) ajustam um cilindro à altura do peito (aproximadamente 1.30 m do solo) para o cálculo do DAP durante o processo de reconstrução e armazena no modelo da árvore.

### 2.4.2 Métodos Iterativos

Tansey et al. (2009) utilizam o *software* Polyworks para o processamento das nuvens de pontos, e o intervalo vertical do conjunto de dados se encontra entre 1.27 e 1.33 m. Os dados foram importados no *software* Matlab para a remoção de ruído. Aschoff, Thies e Spiecker (2004) e Simonse et al. (2003) utilizam passos de 10 cm na Transformada de Hough, mas este valor foi testado por Tansey et al. (2009) e um grande número de troncos foi omitido, de forma que o passo de 1 cm foi determinado para a redução do risco de fustes não serem detectados. A árvore foi dividida em subseções verticais e um algoritmo de clusterização foi utilizado para definir o centro de cada tronco.

O processo de transformação circular de Hough resulta em vários pontos classificados como centro, então os conjuntos de pontos foram classificados para derivar em um único ponto central. A partir de cada centro, outros centros de agrupamentos são pesquisados iterativamente e os pontos dentro de uma distância euclidiana definida são excluídos. Este processo pode ser considerado como uma adaptação do K-Means (HARTIGAN; WONG, 1979 apud TANSEY et al., 2009), e apesar de relativamente simples funciona bem no cenário estudado. O raio médio de cada agrupamento é extraído e convertido em DAP. Para isso, um algoritmo que utiliza o método dos mínimos quadrados baseado em funções de Gauss-Newton ajusta círculo e cilindro para estimar o ponto

central e o raio.

Mesmo com bons resultados para a aproximação do DAP, a estimativa do volume não pôde ser feita no estudo de Tansey et al. (2009) por conta da altura máxima utilizada nas estimativas alométricas ou a altura do ponto de medição direta não ser conhecida. Os estágios do processo onde os erros são mais prováveis de acontecer são a identificação dos troncos e a aproximação do DAP, por conta principalmente da presença de outros tipos de vegetações em torno de 1.3 m do solo. Apesar disto, o processamento dos dados provenientes de escaneamento apresentou bons resultados para o ajuste de métricas florestais.

Wang et al. (2017) apresentam uma abordagem diferente em relação às anteriores, realizando aproximações de curvas através da série de Fourier para a modelagem da seção transversal de troncos. O método realiza a aproximação iterativa da série de Fourier em coordenadas polares para a retirada de ruídos que possam vir a causar erros grosseiros. A aproximação do diâmetro é testada através do ajuste de círculo, série Fourier e a combinação destes dois, com o objetivo de propor um método efetivo para a aquisição de DAP utilizando dados de escaneamento terrestre a laser (TLS, do inglês *terrestrial laser scanning*).

### 2.4.3 Métodos Geométricos

Hopkinson et al. (2004) salientam que técnicas baseadas em tecnologia de varredura, rastreamento e perfilamento a laser têm se mostrado promissoras no estudo de métricas florestais. Realizaram escaneamentos com laser terrestre e coleta de dados manuais para validação no mesmo período de tempo. Dessa forma, a localização dos troncos, altura da árvore, DAP, densidade de troncos e volume de madeira podem ser mensurados através de técnicas automáticas de extração de dados e comparados com os dados reais.

Uma alternativa para a extração das árvores individualizadas da nuvem de pontos tridimensionais é a utilização do *software* proprietário *Polyworks* com o módulo IMInspect (HOPKINSON et al., 2004). O *software* iniciou a seleção dos dados pertencentes a cada árvore através da coordenada central aproximada do tronco e a partir desta informação, definiu um raio horizontal máximo para a copa da árvore em torno deste ponto. Em

alguns casos as nuvens de pontos para cada indivíduo extrapolam seus limites reais e incluem porções da copa de árvores vizinhas. Por este motivo, as nuvens de pontos individualizadas são inspecionadas visualmente para a retirada manual de pontos que não pertencem à árvore em questão.

Hopkinson et al. (2004) utilizam os dados que se encontram entre 1.25 e 1.75 m verticalmente a partir do ponto mais baixo do conjunto de dados e efetua o ajuste de um cilindro. O *software* utiliza o método dos mínimos quadrados nos dados selecionados para o ajuste do cilindro que melhor representa o tronco da árvore. Importante ressaltar que o escaneamento pode não ocorrer por completo em alguns locais do fuste, de maneira que as árvores que apresentam dados insuficientes para o ajuste adequado são omitidas das análises.

Resultados indicam correspondência entre as medições manuais e computacionais para altura e DAP (HOPKINSON et al., 2004). Para o DAP não houve tendência de subestimar ou superestimar os dados de validação. Houve tendência a subestimar a altura da árvore, causada principalmente pela baixa densidade de pontos no topo da copa. Os valores de DAP apresentaram boa relação linear (próxima de 0.85) entre os dados de LiDAR e medições manuais, enquanto para as estimativas de volume os erros foram próximos de 7%. De acordo com os resultados obtidos por Hopkinson et al. (2004) o uso de *software* para a aproximação de métricas florestais evita o consumo excessivo de tempo em campo e a ocorrência de interpretações subjetivas.

A ideia de reconstruir os fustes através de cilindros circulares pode não ser adequada, pois a seção transversal tende a assumir um formato elíptico devido à gravidade (PFEIFER et al., 2004). Mas esta diferença pode diminuir através da aproximação de diversos cilindros ao longo do tronco, de forma que o erro em relação aos dados experimentais diminua. Pfeifer et al. (2004) utilizam o método dos k-vizinhos mais próximos juntamente com o cálculo de autovalores para determinar os pontos no espaço tridimensional que serão considerados para o ajuste do cilindro. Através do uso de uma parametrização de cilindro, os pontos selecionados são utilizados para o ajuste iterativo e solução do problema não linear.

Király e Brolly (2008) apresentam bons resultados com o uso de abordagens

geométricas e estatísticas em dados provenientes de escaneamento a laser. Círculos foram ajustados em planos transversais ao crescimento da árvore em diferentes alturas para modelagem dos troncos. O método de agrupamento estatístico utiliza um critério de similaridade para a clusterização dos pontos, realizando o ajuste de círculos por meio de mínimos quadrados. A segunda abordagem utiliza a forma crescente dos pontos para determinar a posição e o diâmetro do fuste, aplicando um processo iterativo para procura de pontos na vizinhança.

Åkerblom et al. (2015) estudam o erro do modelo e a consistência do processo de reconstrução do fuste com o uso de geometrias primitivas. Cilindros circulares, cilindros elípticos, cones circulares e cilindros poligonais são utilizados como possíveis formas elementares ou geometrias primitivas. A segmentação da nuvem de pontos é realizada para que o processo de modelagem do fuste possa ser executado e as geometrias possam ser ajustadas. Em alguns dos métodos de aproximação utilizados, a presença de valores de entrada significativamente fortes é necessária para que a convergência ocorra de maneira correta. A precisão de reconstrução para as formas distintas foi estudada utilizando modelos tridimensionais gerados computacionalmente, de modo que indique as principais diferenças entre as abordagens utilizadas. As diferenças mais notáveis estão relacionadas à capacidade de adaptação dos métodos de modelagem aos formatos distintos de caules e sua robustez no que se refere à qualidade dos dados.

Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura para determinar os principais métodos geométricos e iterativos para ajuste de parâmetros estruturais de árvores. A pesquisa bibliográfica permitiu constatar que o perfilamento a laser tem sido amplamente empregado e estudado ao longo dos últimos anos. Foi identificado que a maior parte dos trabalhos utiliza florestas de pinus em seus estudos, apesar da existência de biomas relativamente mais complexos. A geometria dos fustes de pinus tende a ser uniforme, de modo que o ajuste de formas mais simples, como círculos, apresenta resultados satisfatórios, ressaltando a importância da busca de métodos para florestas mais complexas, como os manguezais.

Os métodos presentes na literatura propõem principalmente o uso de círculos para

ajustar o diâmetro de fustes de árvores a partir de dados de escaneamento a laser, a fim de facilitar a aquisição de parâmetros de inventários florestais, como DAP e biomassa. Após a análise dos trabalhos relacionados, definimos o uso de círculos, elipses e *splines* para comparar a eficiência desses métodos em troncos de manguezais. O número de escaneamentos do indivíduo estudado também influencia na acurácia dos métodos, de forma que a análise deste parâmetro se torna de extrema importância.

Os resultados apresentados acima mostram sob uma série de aspectos o potencial de aplicação do *scanner* terrestre para a aproximação de parâmetros estruturais e tarefas de manejo florestal. Ainda existem limitações para o uso em florestas mais densas e complexas, de forma que mais estudos devem ser desenvolvidos para promover ampla aplicação dos métodos que utilizam dados tridimensionais (MAAS et al., 2008). O escaneamento tridimensional a laser combinado com ferramentas para o processamento automatizado de dados pode vir a auxiliar pesquisadores no momento de estimar parâmetros florestais, representando uma alternativa em relação ao uso das técnicas tradicionais de extrapolação (PFEIFER et al., 2004).

## 3 Métodos e Resultados

### 3.1 Aquisição dos dados

Os dados experimentais utilizados no presente trabalho foram cedidos pelo professor Filipe Chaves da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, obtidos através de estudos realizados em campo na Reserva Biológica de Guaratiba. Foram realizadas medições referentes ao parâmetro estrutural DAP de 16 árvores da área de estudo, sendo quatro da espécie *Avicennia Schaueriana*, uma *Laguncularia Racemosa* e onze *Rhizophora Mangle*, a fim de serem utilizados para comparação e validação dos resultados do algoritmo.

Os dados referentes ao escaneamento tridimensional dos indivíduos de mangue também foram disponibilizados pelo professor Filipe Chaves. O aparelho utilizado para a captura foi o TLS FARO Laser Scanner Focus 3D, sendo posicionado em 6 posições distintas em torno da área de estudo de acordo com o MSM, a fim de variar o número de leituras. O número de varreduras influencia no tempo necessário para escaneamento da parcela de árvores, de modo que uma comparação da qualidade dos ajustes de acordo com o número de leituras pode vir a auxiliar na diminuição do tempo de uso do *scanner*.

### 3.2 Implementação e Resultados Computacionais

O modelos elaborados neste trabalho foram implementados utilizando a linguagem Python, com o objetivo de diminuir a complexidade das funções desenvolvidas através do uso de módulos e pacotes previamente documentados. Sendo uma linguagem multiplataforma, de alto nível e de código aberto, o Python facilita a escrita de algoritmos funcionais e auxilia na organização de projetos.

O método descrito foi discutido inicialmente em Tavares et al. (2015) e apresentado como parte integrante do Trabalho de Conclusão do Curso de Ciências Exatas da Universidade Federal de Juiz de Fora. A extensão dos resultados obtidos é apresentada no artigo a seguir (TAVARES et al., 2016), assim como a descrição do método desenvolvido.



## MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA APROXIMAÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO DE ÁRVORES DE REGIÕES DE MANGUE VIA ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL A LASER

**Gisele Goulart Tavares, Thales Luís Rodrigues Sabino, Leonardo Goliatt da Fonseca**

{giselegoulart, tluis}@ice.ufjf.br

leonardo.goliatt@ufjf.edu.br

Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia

Campus Universitário, São Pedro, 36036-330, Juiz de Fora, MG, Brasil

**Filipe O. Chaves, Beatriz Cotrim**

{fochaves, beatrizcotrimbfv}@gmail.com

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de Oceanografia

Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**Abstract.** *O inventário florestal é um documento importante para pesquisadores da área da ecologia florestal. Ele contém informações qualitativas e quantitativas de uma floresta de interesse. Dentre as informações apresentadas estão os chamados parâmetros estruturais como: a espécie, o diâmetro dos troncos, altura, área basal, densidade da madeira e geolocalização, além de outras informações que se fizerem relevantes. Este trabalho tem como objetivo a análise de três métodos computacionais para determinação do DAP a partir de dados provenientes de escaneamento tridimensional a laser de indivíduos de uma região de mangue. A partir da nuvem de pontos, a seção transversal do caule a aproximadamente 1,30m do solo foi modelada por círculos, elipses e splines e seu diâmetro calculado em seguida. As aproximações obtidas foram comparadas com as mensurações realizadas em campo e apresentaram bons resultados. A metodologia proposta se mostrou promissora por apresentar um valor baixo de erro percentual e pelo ajuste satisfatório da geometria das árvores. Além disso, ela assiste na apuração dos parâmetros estruturais e possibilita a redução dos trabalhos em campo.*

**Keywords:** *Escaneamento a laser, DAP, Inventário florestal, Manguezal*

## 1 INTRODUÇÃO

Os manguezais são ecossistemas costeiros que ocorrem em regiões tropicais e subtropicais do mundo, ocupando áreas entre marés, portanto, um ecossistema pantanoso (Menezes et al., 2008). Os manguezais estão entre os ecossistemas mais produtivos em termos de sequestro de carbono da atmosfera (Feliciano et al., 2014), logo, quantificar o estoque de carbono das florestas de mangue é de suma importância no estudo do ciclo do carbono e sua influência no clima do planeta.

O LiDAR, do inglês *Light Detection and Ranging*, é uma tecnologia de sensoriamento remoto ativa que mede propriedades de luz refletida para determinar a distância de um objeto afastado. Essa distância é calculada através da medição do atraso entre a transmissão de um pulso laser e a detecção do sinal refletido (Lesky et al., 2002). Devido a capacidade de gerar dados tridimensionais com alta densidade, essa tecnologia está cada vez mais sendo utilizada no campo da ecologia (De Pádua Chaves E Carvalho et al., 2015), geomorfologia (Glenn et al., 2006), sismologia (Lee et al., 2009) e sensoriamento remoto (Brandtberg et al., 2003).

Recentemente, o escaneamento terrestre a laser (TLS) se tornou uma importante ferramenta para adquirir dados tridimensionais de florestas, dada sua capacidade de mapear uma grande área de floresta em um tempo bastante reduzido. O resultado do mapeamento é uma nuvem de pontos 3D que representa com precisão a área escaneada. Por este motivo o uso de TLS para aferição de características florestais, apesar de relativamente recente, tem se mostrado promissor no campo da ecologia computacional. Contudo, mesmo com a precisão dos escâneres atuais, o resultado do processo continua sendo uma nuvem de pontos desconexa, sem informação estrutural ou identificação dos objetos escaneados. Um exemplo de um trecho de floresta obtida através de um equipamento TLS é mostrado na Figura 1.

O estudo da relação entre forma e tamanho de seres vivos é conhecido como alometria. A determinação da biomassa de uma floresta utilizando parâmetros estruturais é, portanto, conhecido como abordagem alométrica. Os modelos matemáticos obtidos através da aplicação da abordagem alométrica são chamados de equações alométricas. No estudo de florestas, essas equações procuram relacionar a forma dos indivíduos com a sua biomassa, de forma a obter uma estimativa para a biomassa em uma grande área de floresta. Um dos problemas com a abordagem alométrica é o trabalho de campo intensivo necessário para levantar os parâmetros de interesse. Além disso, esses parâmetros estão sujeitos a erros de medição que variam entre 10% e 15% (Chave et al., 2005). Outro agravante é que modelos alométricos tendem a ser específicos para uma certa região, dessa forma, reduzir o custo da obtenção de tais modelos é de extrema importância para que mais florestas possam ser estudadas e sua biomassa determinada.

A obtenção de relações alométricas entre o diâmetro na altura do peito (DAP) e a biomassa de uma floresta foram reportados por diversos pesquisadores (Fu and Wu, 2011; Clough and Scott, 1989; Ong et al., 2004; Feliciano et al., 2014; Tavares et al., 2015). O objetivo deste trabalho é a análise de três métodos computacionais para determinação do DAP de indivíduos de florestas de mangue obtidos por TLS. O DAP foi calculado para 16 indivíduos com espécies distribuídas entre *Avicennia Schaueriana*, *Laguncularia Racemosa* e *Rhizophora Mangle* através do ajuste de círculos, elipses e *splines*. Os erros foram obtidos e comparados com o valor do DAP medido em campo e são analisados os coeficientes de correlação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQME) e média das diferenças absolutas (MDA). Apesar da conveniência da utilização de equipamentos de TLS, deve-se levar em conta a vasta quantidade

de dados produzida. É evidente que quanto maior a quantidade de dados, maior será o tempo necessário para efetuar o processamento computacional das nuvens de pontos obtidas. Também é objetivo deste trabalho a análise do impacto que a densidade de pontos tem na determinação do DAP através do ajuste de formas geométricas.

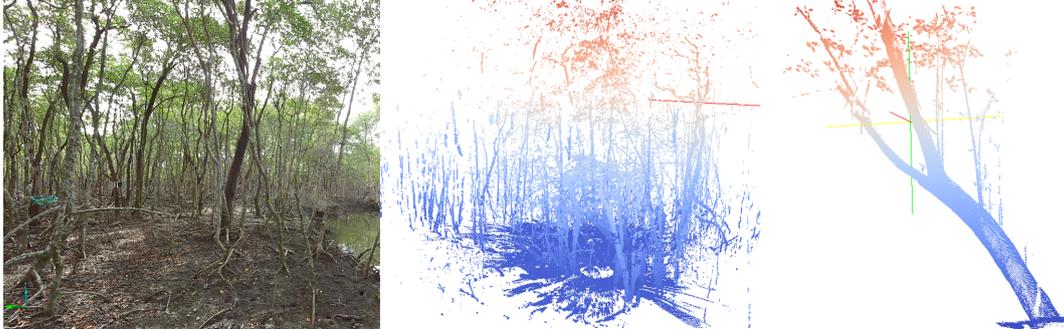


Figura 1: Manguezal, nuvem de pontos e árvore segmentada.

O estudo realizado neste trabalho visa contribuir com o desenvolvimento de um método computacional que possa extrair informações relevantes sobre a estrutura de indivíduos de manguezais para auxílio em atividades de pesquisa em ecologia de florestas. A avaliação da melhor forma de aproximação do DAP mostrada tem por objetivo colaborar com um projeto em desenvolvimento de um sistema aplicado que faz uso de métodos computacionais para auxiliar em atividades de pesquisa sobre inventários florestais. A Figura 2 mostra em destaque a etapa do processo onde ocorre a atuação deste trabalho. Espera-se contribuir também com as etapas de Visualização e Processamento com os estudos aqui realizados.

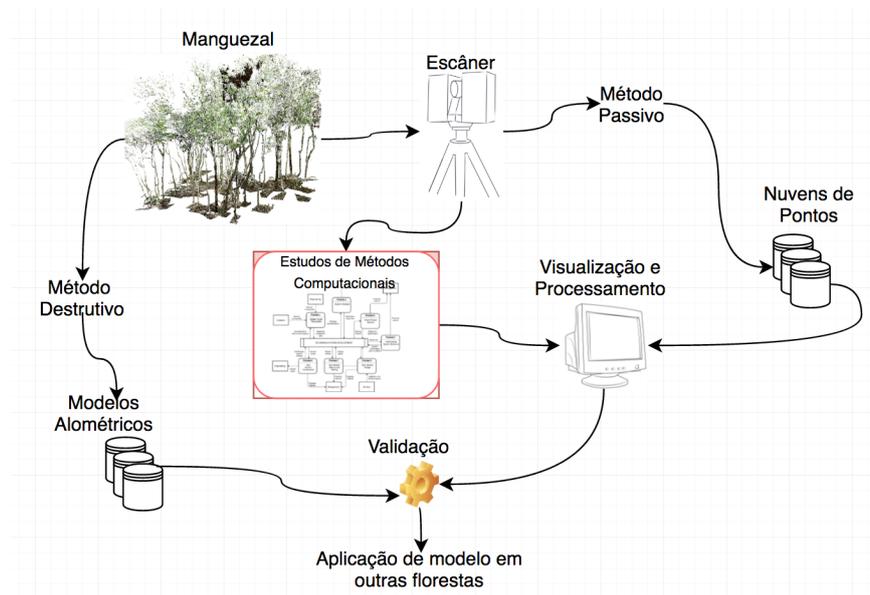


Figura 2: Fluxo de dados na realização de estudos em ecologia envolvendo métodos computacionais. Destacado na figura encontra-se a etapa de contribuição deste trabalho no estudo de métodos computacionais para extração de parâmetros de interesse a partir de nuvens de pontos de florestas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo, mostrada na Figura 3, é a Reserva Biológica de Guaratiba (RBG) uma unidade de conservação que engloba um complexo de florestas de mangue com área total de 28,3 km<sup>2</sup>, sendo 20,9 km<sup>2</sup> de florestas de mangue e 7,4 km<sup>2</sup> de planícies hipersalinas (Almeida, 2007). Estão presentes ao fundo da baía de Sepetiba, na sua porção leste, que se localiza no litoral sul, a sudoeste do Estado do Rio de Janeiro compreendida entre os paralelos 22° 53' S e 23° 05' S e os meridianos 043° 33' W e 044° 01' W. Neste complexo situa-se o campo experimental do laboratório NEMA/UERJ que possui diversos estudos desenvolvidos ao longo dos últimos 20 anos em ecologia de manguezais.

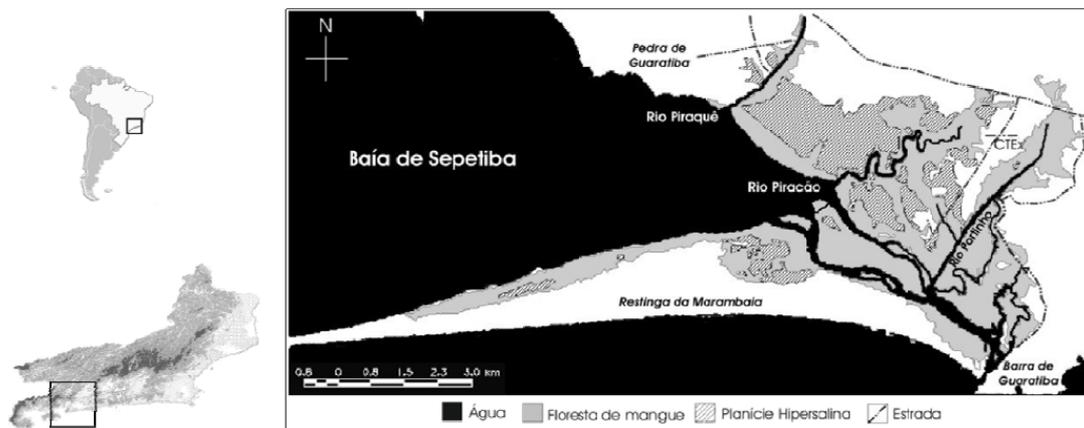


Figura 3: Visão geral da região de estudo.

### 2.2 Obtenção dos Dados

O equipamento de TLS adquire uma nuvem de pontos tridimensional a partir de uma posição fixa. Isso quer dizer que, em boa parte dos casos, é necessária a realização de mais de uma leitura, e as nuvens de pontos geradas devem passar por um processo de consolidação, obtendo uma nuvem de pontos que possui dados que cobrem todas as áreas de interesse. Esse processo de consolidação é conhecido como registro de nuvem de pontos. Em alguns casos, duas ou três leituras podem ser suficientes, por exemplo, em aplicações de inspeção de construções ou análise forense. Na aplicação apresentada, deve-se levar em consideração que florestas de mangue não apresentam uma estrutura organizada, fazendo com que um número maior de leituras seja necessária para capturar todos os lados de todas as árvores.

É importante notar que quanto maior o número de leituras efetuadas, maior é a densidade de pontos gerada pelo equipamento. No entanto, esse aumento de densidade implica em um maior tempo de uso do escâner. É importante tentar reduzir esse número de forma a reduzir também o tempo necessário para obtenção dos dados e, conseqüentemente, reduzir o tempo necessário para fazer o processamento dos dados.

Para o mapeamento da região de mangue o equipamento escolhido foi o TLS FARO Laser Scanner Focus 3D, adequado para escaneamentos a grandes distâncias, que realiza uma leitura



Figura 4: Comparação do número de leituras (1 leitura na extrema esquerda até 6 leituras na extrema direita) realizadas no indivíduo 7 da RBG. Conforme o aumento das cenas é possível ver de maneira mais detalhada a estrutura da árvore, com nuvens de pontos com estrutura bastante semelhante para 4, 5 e 6 leituras.

de  $360^\circ$  em torno de seu eixo horizontal e  $305^\circ$  em torno do eixo vertical. As demais especificações técnicas são mostradas na Tabela 1. O escâner consegue capturar de forma satisfatória a estrutura das árvores, possibilitando boa visualização de galhos e folhas.

Foram escaneadas 16 árvores da Reserva Biológica de Guaratiba, sendo 4 da espécie *Avicennia Schaueriana*, 1 *Laguncularia Racemosa* e 11 *Rhizophora Mangle*, como mostrado na Tabela 2. Para cada indivíduo da área monitorada foram realizadas de 1 a 6 leituras a partir de pontos fixos pré-estabelecidos, de forma que a área monitorada estivesse bem representada sob vários ângulos.

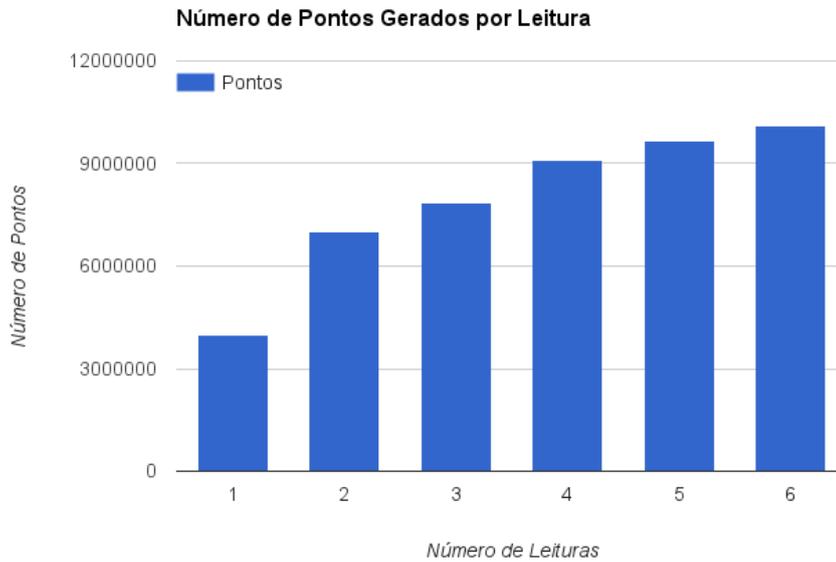
Houve a variação do parâmetro relativo ao número de leituras a fim de avaliar a representação tridimensional da estrutura arbórea e a relação entre o número de cenas capturadas e os melhores ajustes. Após o escaneamento o software Scene, desenvolvido para o FARO Focus 3D, foi utilizado para a digitalização dos dados obtidos, processamento e individualização das árvores.

Para demonstrar a quantidade de dados que foi gerada no experimento realizado, a quantidade de pontos dos indivíduos foi somada para cada quantidade de leituras efetuadas. Esses valores podem ser vistos na Figura 5. Como pode ser visto, o número de pontos varia aumenta consideravelmente a medida que o número de leituras também aumenta.

## 2.3 Métodos

Entre as tarefas realizadas no trabalho de campo feito na área de estudo, foi feito o levantamento do DAP das 16 árvores que foram escaneadas. Esse valor será usado como base nas comparações com os valores calculados a partir das nuvens de pontos.

O primeiro passo para calcular o DAP a partir da nuvem de pontos é determinar os pontos



**Figura 5:** Comparação do número de leituras (1 leitura na extrema esquerda até 6 leituras na extrema direita) realizadas no indivíduo 7 da RBG. Conforme o aumento das cenas é possível ver de maneira mais detalhada a estrutura da árvore, com nuvens de pontos visualmente semelhantes para 4, 5 e 6 leituras.

que estão a 1.30m do chão. A partir desses pontos uma forma geométrica conhecida é ajustada e então o valor do diâmetro é calculado e comparado. Para determinar esses pontos o seguinte procedimento é realizado

1. Estabelecimento da altura de onde os pontos vão ser extraídos:  $h = 1.30m$  e do valor de tolerância  $\Delta h = 0.009m$ ;
2. Para cada ponto  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$  da nuvem de pontos é verificado se  $|p_z - h| < 0.009$ , ou seja, se o ponto encontra-se em uma região em torno de 1.30m de altura do chão;

O valor de tolerância foi escolhido de forma empírica baseado na densidade de pontos colhidos pelo escâner. Os pontos que passam nessa verificação são considerados os pontos que correspondem ao local onde a medição do DAP foi realizada e as formas geométricas serão ajustadas nesse subconjunto de pontos.

**Tabela 1:** Especificações técnicas do FARO Laser Scanner Focus 3D

FARO Laser Scanner Focus 3D	
Classe	Classe de laser 1
Alcance	0.6 - 330m
Velocidade de aquisição	976000 pontos/segundo
Precisão	$\pm 2mm$
Peso	5.2kg

**Tabela 2: Relação das espécies estudadas**

Rótulo	Espécie	Rótulo	Espécie
1	Avicennia schaueriana	30	Rhizophora mangle
7	Avicennia schaueriana	38	Rhizophora mangle
10	Avicennia schaueriana	43	Rhizophora mangle
11	Avicennia schaueriana	47	Rhizophora mangle
17	Laguncularia racemosa	50	Rhizophora mangle
19	Rhizophora mangle	52	Rhizophora mangle
21	Rhizophora mangle	82	Rhizophora mangle
22	Rhizophora mangle	92	Rhizophora mangle

Com o objetivo de orientar os pontos filtrados na direção de maior variação, foi feito uso na análise de componentes principais (PCA) de forma que a direção de maior variação fique orientada no eixo-x e a de menor variação no eixo-z.

A fim de determinar a forma ajustada cujo diâmetro melhor se aproxima do DAP medido em campo, é necessário, a partir dos pontos filtrados encontrar uma maneira de determinar os parâmetros das formas a serem ajustadas. Neste trabalho foram escolhidas as formas círculo, elipse e *spline*. Cada método será detalhado a seguir.

### Ajuste do Círculo

Para realizar o ajuste de um círculo no conjunto de dados filtrado, os pontos extremos são escolhidos com o intuito de descobrir o tamanho  $C$  da corda que liga esses dois pontos. A menor distância entre o segmento de reta que liga os extremos até os demais pontos a serem utilizados para a aproximação é calculada, de maneira que a maior delas, chamada de flecha  $F$ , também aparece como parâmetro na Equação 1 definida por:

$$R = \frac{\left(\left(\frac{C}{2}\right)^2 + F^2\right)}{(2F)} \quad (1)$$

onde  $C$  é chamado de tamanho da corda e  $F$  de flecha e  $R$  é o raio que será usado na comparação com o DAP medido em campo.

### Ajuste da Elipse

O ajuste da elipse no conjunto de pontos é feito da seguinte forma:

1. O baricentro dos dados é determinado;
2. O ângulo de rotação em torno do centro que melhor se ajuste aos pontos recebidos como parâmetro é encontrado;
3. O tamanho dos eixos maior e menor é estabelecido;
4. A elipse aproximada é calculada utilizando centro, ângulo de rotação e eixos obtidos anteriormente.

### Ajustes da *Spline*

Matematicamente, uma *spline* é utilizada para fazer a interpolação de uma função por partes utilizando polinômios de um grau menor, de forma a evitar fazer a interpolação utilizando um único polinômio de grau maior, evitando assim o aparecimento do efeito de Runge, que surge quando um polinômio de grau alto é utilizado para fazer a interpolação.

Os pontos filtrados são considerados pontos de uma função que e uma *spline* de grau 5 é utilizada para fazer esse ajuste.

### Cálculo do Diâmetro

Para cada uma das formas ajustas é preciso encontrar uma relação com o diâmetro medido em campo. O diâmetro do círculo é determinado de forma direta.

O valor do DAP extraído da elipse e da *spline* é calculado de forma semelhante, as funções de ajuste retornam também a área das geometrias. Levando em conta que a seção transversal das árvores possui forma aproximadamente circular, interpretamos o resultado como área do círculo e utilizamos a Equação 2 para definir o raio da figura plana.

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

onde  $R$  corresponde ao raio aproximado e  $A$  representa a área retornada pela função de ajuste.

Os seguintes critérios estatísticos foram utilizados para avaliação dos resultados ajustados: Erro Relativo ( $ER$ ), entre os valores reais e estimados, raiz quadrada do erro quadrático médio ( $RQEM$ ), média das diferenças absolutas ( $MDA$ ) e coeficiente de correlação ( $Ry\hat{y}$ ). Estas estatísticas foram estimadas através das Equações 3, 4, 5 e 6.

$$ER(\%) = 100 \frac{|\hat{Y} - Y|}{Y} \quad (3)$$

$$RQEM(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2} \quad (4)$$

$$MDA = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \right) \quad (5)$$

$$Ry\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2)(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}}; \hat{Y}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n} \quad (6)$$

onde  $Y_i$ ,  $\hat{Y}_i$  e  $\bar{Y}$  representam os valores reais, os estimados e a média da variável sob análise, respectivamente, e  $n$  representa o número de casos.

## 3 RESULTADOS

Para cada um dos indivíduos obtidos a partir do escaneamento tridimensional da área monitorada foi realizado o ajuste do DAP através de círculos, elipses e *splines*. O resultado aproximado pelo algoritmo foi comparado com o esperado, medido por meio de técnicas convencionais para verificação do diâmetro à altura do peito.

Foram comparados os ajustes de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 leituras, com a intenção de encontrar o número de escaneamentos suficiente para um bom ajuste do diâmetro. Os três métodos apresentaram comportamentos semelhantes principalmente em 4, 5 e 6 cenas, como mostrado na Figura 6, um indicativo de que o número conveniente de escaneamentos encontra-se neste intervalo.

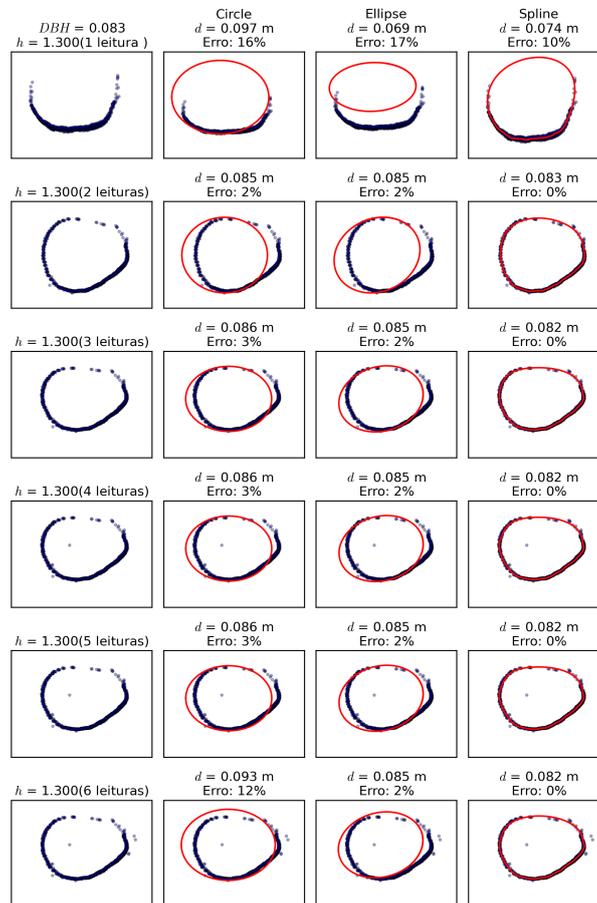


Figura 6: Comparação dos ajustes para o indivíduo 22. Os três métodos apresentam comportamentos semelhantes na maior parte das leituras por conta da qualidade dos dados ser suficiente para as aproximações.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os ajustes retornados pelo algoritmo em 2 e 6 leituras, comparados com os valores reais através do erro relativo percentual.

Quando analisamos a Tabela 3, referente a realização de 2 leituras é possível notar que existem altos valores de erro, em torno de 300% nos ajustes da *spline*. Esse comportamento se deve aos dados serem insuficientes para ao ajuste ou formarem uma figura desconexa, fazendo com que o algoritmo não consiga realizar os cálculos corretamente. As Figuras 9, 10 e 11 mostram o comportamento dos erros para as árvores e sua variação com a forma utilizada para aproximação do DAP e o número de leituras. É importante notar que na Figura 11 não estão disponíveis os erros para 1, 2 e 3 leituras. Os respectivos erros foram removidos por terem um valor muito alto ( $> 500\%$ ) como exemplificado na Figura 8, sendo considerados insatisfatórios.

As medidas de precisão para 1, 2, 3, 4, 5 e 6 leituras são apresentadas na Tabela 5. Os coe-

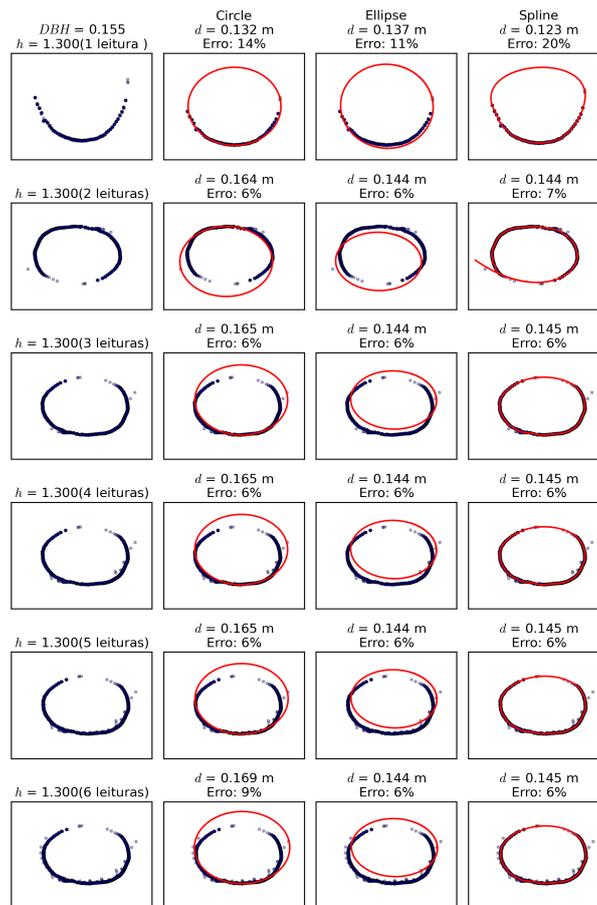


Figura 7: Comparação dos ajustes para o indivíduo 11. Os três métodos apresentam comportamentos semelhantes na maior parte das leituras por conta da qualidade dos dados ser suficiente para as aproximações.

ficientes de correlação ( $R_{y\hat{y}}$ ) em 4, 5 e 6 leituras se encontram próximos de 1, indicando que as aproximações computacionais e os dados reais estão fortemente correlacionados. No intervalo de 1 a 3 leituras a *spline* apresenta baixos valores de  $R_{y\hat{y}}$ , de forma que os resultados computacionais e experimentais possuem correlação moderada quando essa medida se aproxima de 0.7 e desprezível quando próxima de 0.

A RQEM mede com quanta precisão o método prevê a resposta. Dessa forma, exceto para a *spline* em 1, 2 e 3 leituras os valores de RQEM foram baixos, indicando boas aproximações para DAP. A MDA fornece a ideia de amplitude dos erros, confirmando boa precisão na maior parte dos ajustes.

De acordo com a análise do RQEM e  $R_{y\hat{y}}$  pode-se verificar que a melhor forma geométrica utilizada para aproximar o diâmetro das árvores analisadas é a elipse. Os troncos das árvores possuem uma forma aproximadamente elíptica, desta maneira era esperado que a elipse fosse a geometria que melhor aproximasse o DAP real.

É importante notar que a aproximação por *splines* foi boa para um número maior de leituras (4, 5 e 6), no entanto, é importante levar em conta que um maior número de leituras implica em

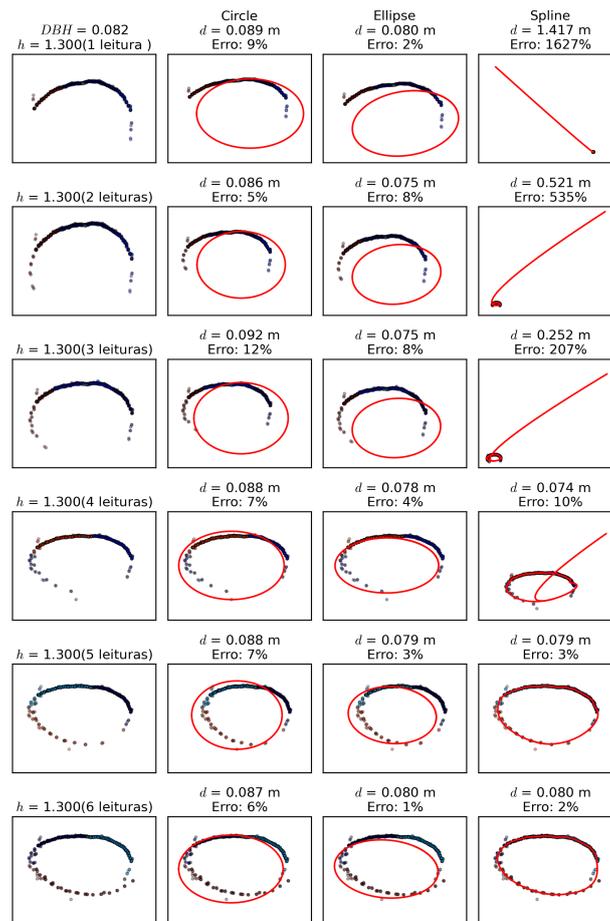


Figura 8: Comparação dos ajustes para o indivíduo 30. É possível notar que a *spline* apresentou comportamento insatisfatório em 1, 2 e 3 leituras, com altos valores de erro. Isso ocorreu por conta do método considerar os dados utilizados insuficientes para os ajustes.

um maior tempo de trabalho de campo. Encontrar uma boa aproximação com uma quantidade menor de dados é o ideal para agilizar a produção de resultados.

## 4 CONCLUSÕES

Através das análises efetuadas conclui-se que a melhor para aproximar o DAP nas árvores de espécies de *Avicennia schaueriana*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora mangle* é a elipse, dado que é a forma que mais se aproxima da forma dos troncos. Apesar de este ser um resultado esperado, é importante obter uma confirmação baseada na comparação com outras formas geométricas.

A concepção e modelos alométricos para predição da quantidade de biomassa de uma floresta é comumente feita através do estabelecimento de uma relação entre o DAP e a biomassa. No entanto, o levantamento de inventários florestais mais detalhados é uma demanda crescente, a fim de reduzir a granularidade da estimativa da quantidade de carbono presente em um território. Com isso em vista, é proposto como trabalho futuro a determinação do diâmetro dos troncos

**Tabela 3: Resultados das aproximações em 2 leituras com o uso de círculos, elipses e *splines* do DAP em centímetros dos indivíduos da RBG. Ao lado são apresentados os valores de erro percentual em relação ao valor real. Em algumas árvores os erros para os ajustes da *spline* foram altos por conta dados serem insuficientes ou formarem uma figura desconexa.**

Árvore	DAP Real	Círculo	Erro (%)	Elipse	Erro (%)	Spline	Erro (%)
1	14.8	14.47	2.21	13.88	6.21	61.60	315.94
7	26.8	28.02	4.57	25.16	6.13	24.90	7.16
10	17.1	16.76	2.01	16.39	4.14	16.10	6.07
11	15.5	16.45	6.11	14.44	6.84	14.40	7.39
17	17.2	19.05	10.78	15.81	8.07	15.80	8.11
19	7.1	9.48	33.49	8.11	14.17	7.86	10.69
21	5.9	7.40	25.46	5.34	9.56	5.49	6.95
22	8.3	8.51	2.57	8.49	2.23	8.27	0.37
30	8.2	8.61	5.05	7.54	8.08	52.10	535.05
38	9.6	10.17	5.98	10.01	4.31	9.58	0.22
43	10.2	12.33	20.85	10.39	1.88	9.90	2.92
47	8.6	9.86	14.70	8.45	1.71	69.00	702.76
50	5.8	6.85	18.14	5.20	10.32	5.26	9.30
52	8.8	9.00	2.27	8.43	4.22	36.80	318.69
82	10	12.41	24.05	12.52	25.24	11.50	14.74
92	9	9.90	11.11	8.4	6.67	7.00	22.22

dos manguezais em diversas alturas, a fim de determinar o volume com maior precisão. É proposto também como trabalho futuro a possibilidade da inclusão da detecção de ramificações e o estudo dos métodos propostos neste trabalho atuando nessas condições.

A crescente adoção de equipamentos TLS por parte dos pesquisadores torna o tipo de estudo realizado neste trabalho de extrema relevância para a área de ecologia. A determinação dos melhores parâmetros para aproximação da estrutura real das árvores deve ser levada em conta ao determinar a quantidade de biomassa presente em uma certa região de floresta. Espera-se que os levantamentos feitos neste trabalho possam ser utilizados por pesquisadores no momento de estimar parâmetros a partir de nuvens de pontos de florestas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa FARO, que por meio de seu representante Adriano Scheuer possibilitou o escaneamento das florestas de mangue de Guaratiba e a Embrapa Agroindústria de Alimentos pela disponibilização dos espaços para limpeza do material.

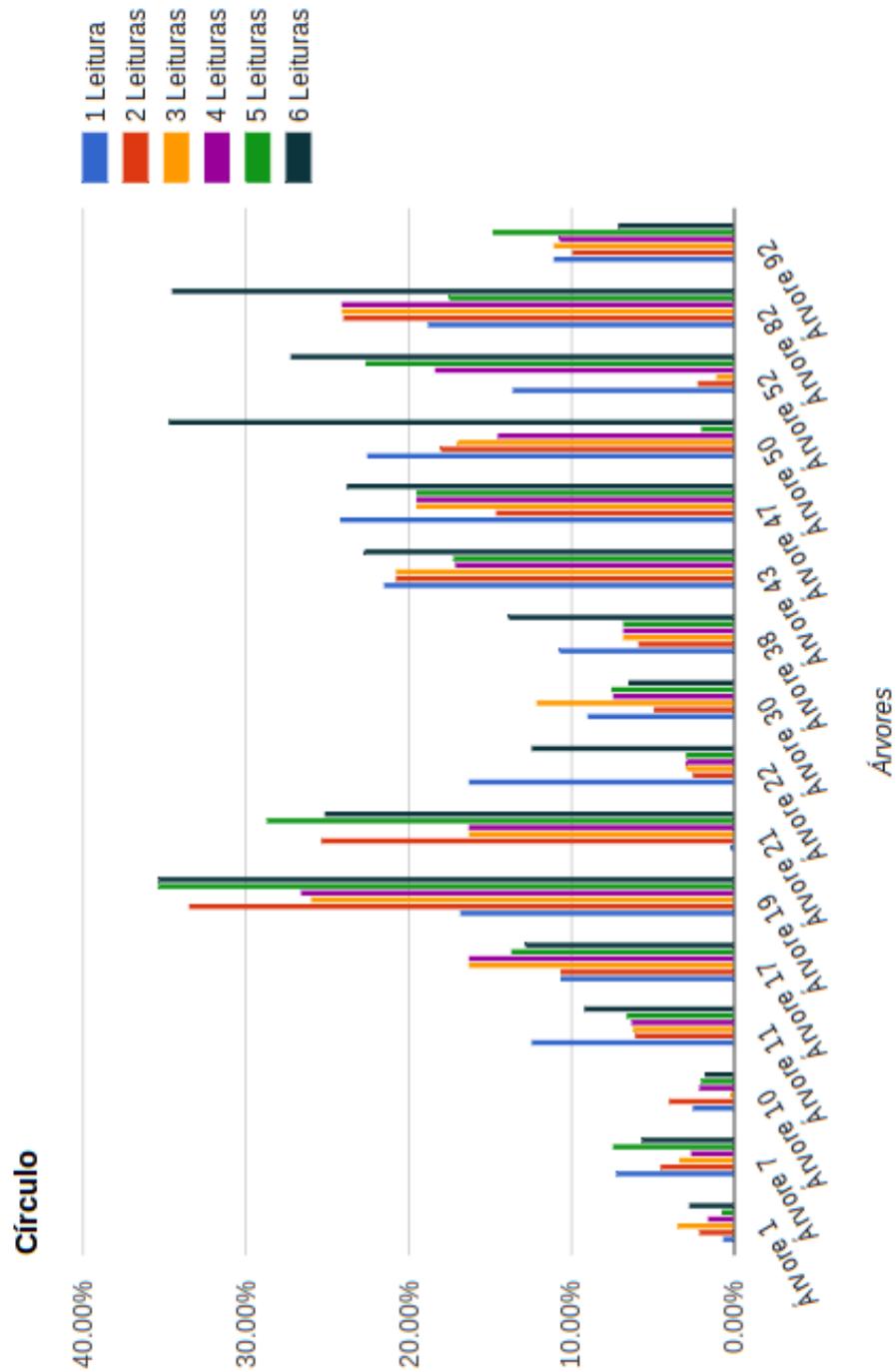
Agradecemos também as agências CNPq e FAPEMIG pelo auxílio financeiro, ao Núcleo de Estudos em Manguezais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, ao Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional e ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio na realização deste trabalho.

**Tabela 4: Resultados das aproximações em 6 leituras com o uso de círculos, elipses e *splines* do DAP em centímetros dos indivíduos da RBG. Ao lado são apresentados os valores de erro percentual em relação ao valor real.**

Árvore	DAP Real	Círculo	Erro (%)	Elipse	Erro (%)	Spline	Erro (%)
1	14.8	15.21	2.79	14.72	0.54	14.70	0.50
7	26.8	28.34	5.76	26.36	1.64	26.30	1.69
10	17.1	17.42	1.90	16.31	4.59	16.00	6.51
11	15.5	16.94	9.29	14.42	6.95	14.50	6.76
17	17.2	19.43	12.96	15.71	8.66	16.40	4.90
19	7.1	9.61	35.41	7.21	1.48	7.17	1.01
21	5.9	7.39	25.17	5.83	1.15	5.82	1.41
22	8.3	9.34	12.52	8.49	2.32	8.25	0.61
30	8.2	8.73	6.51	8.05	1.87	8.01	2.37
38	9.6	10.94	13.93	10.00	4.15	9.66	0.62
43	10.2	12.52	22.79	10.36	1.53	10.10	0.80
47	8.6	10.65	23.84	8.36	2.80	8.23	4.28
50	5.8	7.82	34.81	6.11	5.31	6.07	4.63
52	8.8	11.20	27.30	9.29	5.58	9.25	5.13
82	10	13.46	34.63	11.56	15.56	11.60	16.01
92	9	9.65	7.21	7.69	14.50	7.74	14.03

**Tabela 5: Medidas de precisão de 1 a 6 leituras para cada um dos métodos. Os valores foram calculados utilizando os resultados aproximados pelo algoritmo e os valores reais obtidos em campo**

Método	Medida	Número de Leituras					
		1	2	3	4	5	6
Círculo	$R_{\hat{y}y}$	0.973	0.986	0.989	0.985	0.989	0.987
	RQEM	12.558	11.726	12.175	12.184	13.097	15.959
	MDA	1.270	1.130	1.145	1.177	1.271	1.611
Elipse	$R_{\hat{y}y}$	0.892	0.995	0.988	0.983	0.988	0.991
	RQEM	26.354	7.041	7.386	8.782	7.711	6.560
	MDA	1.989	0.691	0.650	0.668	0.620	0.553
Spline	$R_{\hat{y}y}$	-0.068	-0.119	0.623	0.992	0.991	0.993
	RQEM	234.512	2980.988	44.980	6.661	6.910	6.143
	MDA	16.862	95.144	2.339	0.586	0.588	0.501



**Figura 9:** Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de círculos para aproximação do DAP para cada uma das árvores.

CILAMCE 2016

Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering  
Suzana Moreira Ávila (Editor), ABMEC, Brasília, DF, Brazil, November 6-9, 2016

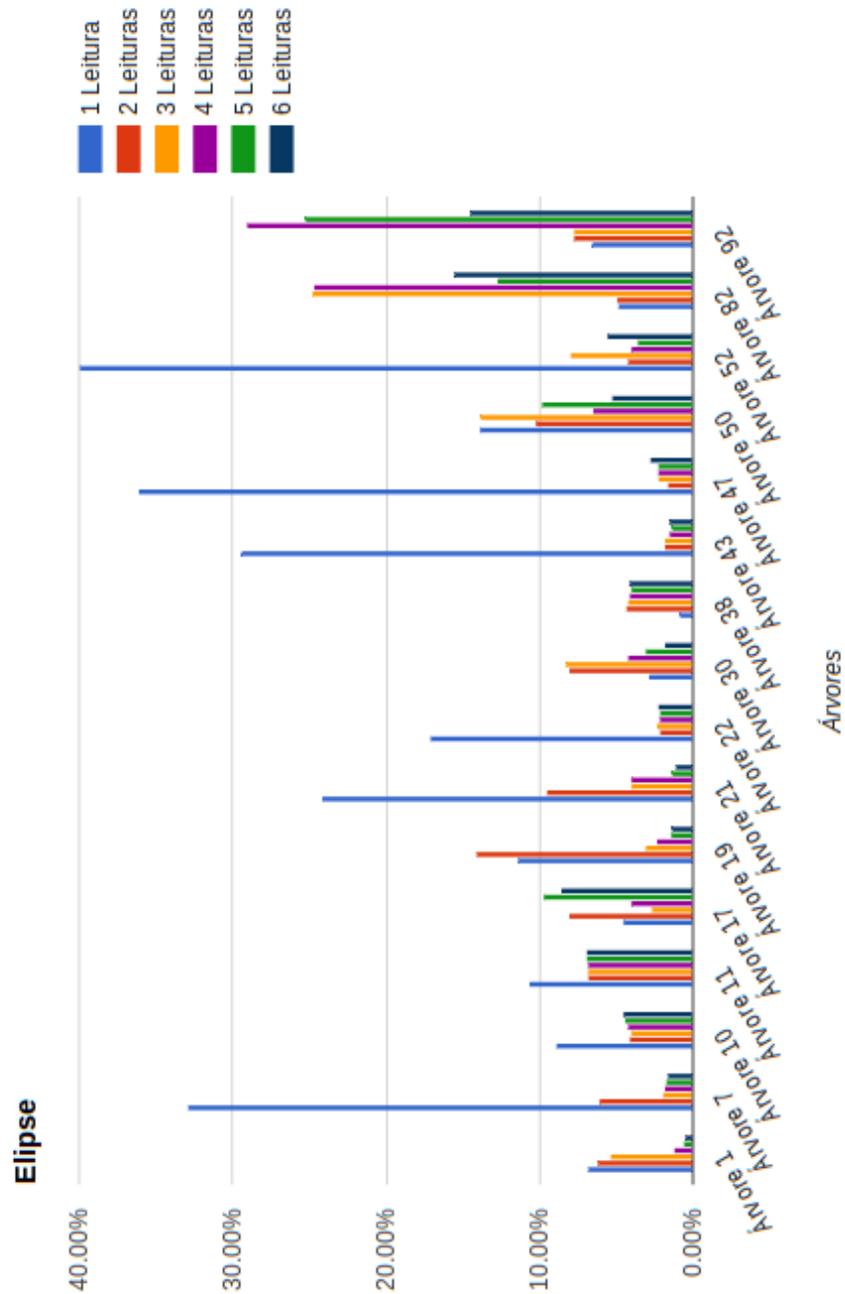
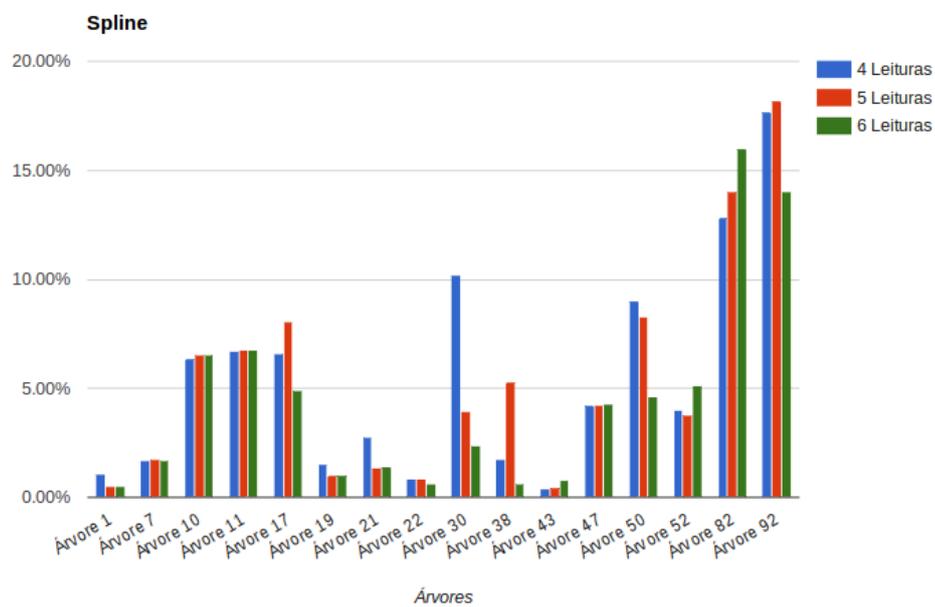


Figura 10: Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de elipses para aproximação do DAP para cada uma das árvores.



**Figura 11:** Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de *splines* para aproximação do DAP para cada uma das árvores.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, P. (2007). Utilização de imagens de satélite para análise multi-temporal do manguezal de guaratiba-rj. *Monografia de Bacharelado. Departamento de Oceanografia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 91p.*
- Brandtberg, T., Warner, T. A., Landenberger, R. E., and McGraw, J. B. (2003). Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85(3):290–303.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., and Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1):87–99.
- Clough, B. and Scott, K. (1989). Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology and Management*, 27(2):117–127.
- De Pádua Chaves E Carvalho, S., Estraviz Rodriguez, L. C., Silva, L. D., De Carvalho, L. M. T., Calegario, N., De Lima, M. P., Silva, C. A., De Mendonça, A. R., and Nicoletti, M. F. (2015). Predição do volume de árvores integrando Lidar e Geoestatística. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, 43(107):627–637.
- Feliciano, E. A., Wdowinski, S., and Potts, M. D. (2014). Assessing mangrove above-ground biomass and structure using terrestrial laser scanning: A case study in the everglades national park. *Wetlands*, 34(5):955–968.
- Fu, W. and Wu, Y. (2011). Estimation of aboveground biomass of different mangrove trees based on canopy diameter and tree height. *Procedia Environmental Sciences*, 10(PART C):2189–2194.
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., and Dorsch, S. J. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73(1-2):131–148.
- Lee, S. J., Chan, Y. C., Komatitsch, D., Huang, B. S., and Tromp, J. (2009). Effects of realistic surface topography on seismic ground motion in the Yangminshan region of Taiwan based upon the spectral-element method and LiDAR DTM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2 A):681–693.
- Lesky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., and Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52(1):19–30.

- Menezes, M. P. M. d., Berger, U., and Mehlig, U. (2008). Mangrove vegetation in amazonia: a review of studies from the coast of pará and maranhão states, north brazil. *Acta Amazonica*, 38(3):403–420.
- Ong, J., Gong, W., and Wong, C. (2004). Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*. *Forest Ecology and Management*, 188(1-3):395–408.
- Tavares, G. G., Goliatt, L., Neves, G. H. C., Bastos, F. S., Chaves, F. O., and Sabino, T. L. R. (2015). Estimativa da biomassa arbórea de regiões de mangue via escaneamento tridimensional a laser - comparação de métodos computacionais. Proceedings of XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering.

## 4 Discussão e Conclusões

O presente trabalho permitiu estudar a aplicação de modelos que visam automatizar a aquisição do parâmetro estrutural DAP de árvores provenientes de escaneamento terrestre a laser. Os algoritmos desenvolvidos para o ajuste de círculos, elipses e *splines* permitiram a comparação do método automático com os dados obtidos através de medições experimentais (TAVARES et al., 2016).

A espécie das árvores não influenciou diretamente no ajuste dos modelos geométricos e de interpolação, e o método que apresentou melhor comportamento nas árvores testadas foi o de elipse, por conta de apresentar menores valores de erro e melhores medidas de precisão ao longo do aumento do número de leituras do *scanner*. Os círculos também apresentaram resultados satisfatórios nos ajustes, mas por conta da geometria elíptica dos troncos a elipse apresentou menores valores de Raiz Quadrada do Erro Quadrático médio (RQEM), indicando maior precisão na previsão da resposta. Nas aproximações com o uso de 1, 2 e 3 leituras do *scanner*, a *spline* apresentou 4 valores altos de erro relativo (dados não apresentados) e resultados insatisfatórios nas medidas de precisão, indicando que o método deve ser utilizado com um número maior de escaneamentos (4, 5 e 6 leituras). Apesar disso, os 3 métodos apresentaram resultados satisfatórios em 4, 5 e 6 escaneamentos, apontando que o número de leituras recomendado da área de estudo se encontra neste intervalo.

A partir dos dados experimentais foi possível medir a acurácia do método de aproximação de DAP com o uso de círculo, elipse e *spline*, de modo que os resultados encontrados foram satisfatórios. Contudo, mais testes devem ser realizados em manguezais e diferentes biomas para a validação do método. Os resultados encontrados indicam a possibilidade de aplicação em estudos de ecologia de manguezais, de forma que o método possa vir a ser utilizado como ferramenta em trabalhos de campo.

## 4.1 Trabalhos Futuros

Os dados de DAP permitem a aproximação da biomassa da árvore através dos modelos alométricos, mas a implementação do cálculo do volume de forma automática pode tornar o inventário mais direto e intuitivo. Dessa forma, o estudo de métodos para o cálculo do volume das partes da árvore é proposto como trabalho futuro, assim como o estudo de técnicas de segmentação de raízes, fuste e dossel. A implementação de detecção de bifurcações também é visada através do uso de métodos de clusterização, de modo a tratar árvores com mais de um tronco e com galhos.

O aperfeiçoamento do método descrito neste trabalho também é pretendido, a fim de diminuir os erros relativos nos ajustes de círculos e elipses e melhorar os resultados da *spline* em 1, 2 e 3 leituras. Outras informações podem ser estimadas de forma automática, como área de sombra, relação entre diâmetro e volume, e classificação das espécies. A determinação destes parâmetros pode vir a auxiliar na elaboração de inventários florestais, tornando o trabalho em campo menos custoso e permitindo um acompanhamento mais efetivo do desenvolvimento de áreas de florestas ao longo dos anos através do uso de equipamentos de TLS.

## Bibliografia

- ÅKERBLOM, M. et al. Analysis of geometric primitives in quantitative structure models of tree stems. *Remote Sensing*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 4, p. 4581–4603, 2015.
- ÅKERBLOM, M. et al. Automatic tree species recognition with quantitative structure models. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 191, p. 1–12, 2017.
- ASCHOFF, T.; THIES, M.; SPIECKER, H. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 35, n. 5, p. 237–241, 2004.
- CALDEIRA, M. V. W. *Determinação de biomassa e nutrientes em uma floresta ombrófila mista Montana em General Carneiro, Paraná*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2003.
- CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, Springer, v. 145, n. 1, p. 87–99, 2005.
- DONATO, D. C. et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, Nature Research, v. 4, n. 5, p. 293–297, 2011.
- FELICIANO, E. A.; WDOWINSKI, S.; POTTS, M. D. Assessing mangrove above-ground biomass and structure using terrestrial laser scanning: a case study in the everglades national park. *Wetlands*, Springer, v. 34, n. 5, p. 955–968, 2014.
- GORTE, B.; PFEIFER, N. Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology. *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 35, p. 929–933, 2004.
- GOUVEIA, N. et al. Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no município de São Paulo, Brasil. *Cad Saúde Pública*, SciELO Brasil, v. 22, n. 12, 2006.
- HACKENBERG, J. et al. Simpletree—an efficient open source tool to build tree models from TLS clouds. *Forests*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 11, p. 4245–4294, 2015.
- HARTIGAN, J. A.; WONG, M. A. Algorithm as 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, JSTOR, v. 28, n. 1, p. 100–108, 1979.
- HOPKINSON, C. et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, NRC Research Press, v. 34, n. 3, p. 573–583, 2004.
- KIM, J. Y. et al. Panel discussion review: session two—interpretation of observed associations between multiple ambient air pollutants and health effects in epidemiologic analyses. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, Nature Publishing Group, v. 17, p. S83–S89, 2007.

KIRÁLY, G.; BROLLY, G. Modelling single trees from terrestrial laser scanning data in a forest reserve. *The Photogrammetric Journal of Finland*, v. 21, n. 1, p. 37–50, 2008.

LIANG, X. et al. Plot-level trunk detection and reconstruction using one-scan-mode terrestrial laser scanning data. In: IEEE. *Earth Observation and Remote Sensing Applications, 2008. EORSA 2008. International Workshop on*. [S.l.], 2008. p. 1–5.

LIANG, X. et al. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 50, n. 2, p. 661–670, 2012.

MAAS, H.-G. et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International journal of remote sensing*, Taylor & Francis, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MERCKER, D. C.; HENNING, J. G. Forestry 101:conducting a simple timber inventory. *Tree Farmer*, p. 30, May/June 2011.

NICOLETTI, M. F. *Comparação de métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

NOWAK, D. J.; CRANE, D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the usa. *Environmental pollution*, Elsevier, v. 116, n. 3, p. 381–389, 2002.

OLIVEIRA, A. C. *Geotecnologia na estratificação de povoamentos de Eucalyptus spp*. 2006.

PARDE, J. et al. Forest biomass. In: *Forestry Abstracts*. [S.l.: s.n.], 1980. v. 41, n. 8, p. 343–362.

PFEIFER, N. et al. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. In: ISPRS ISTANBUL. *Proceedings of 20th ISPRS Congress*. [S.l.], 2004. p. 114–119.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. *As florestas e o carbono*. Curitiba, p. 119–140, 2002.

SANQUETTA, C. R. et al. Estimativa de carbono individual para araucaria angustifolia. *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, v. 1, n. 1, p. 10–1590, 2014.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in costa rica. *Biotropica*, Wiley Online Library, v. 37, n. 1, p. 2–8, 2005.

SEIDEL, D. et al. 3D-laser scanning: A non-destructive method for studying above-ground biomass and growth of juvenile trees. *Agricultural and forest meteorology*, Elsevier, v. 151, n. 10, p. 1305–1311, 2011.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. *Floresta*, v. 38, n. 1, 2008.

SIMONSE, M. et al. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning. In: *Proceedings of the scandlaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2003, p. 252–258.

TAHVANAINEN, T.; FORSS, E. Individual tree models for the crown biomass distribution of scots pine, norway spruce and birch in finland. *Forest Ecology and Management*, Elsevier, v. 255, n. 3, p. 455–467, 2008.

TANSEY, K. et al. Estimating tree and stand variables in a corsican pine woodland from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, v. 30, n. 19, p. 5195–5209, 2009.

TAVARES, G. et al. *Estimativa da biomassa arbórea de regiões de mangue via escaneamento tridimensional a laser - comparação de métodos computacionais*. 2015.

TAVARES, G. G. et al. Métodos computacionais para aproximação do diâmetro à altura do peito de árvores de regiões de mangue via escaneamento tridimensional a laser. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE*, v. 2, n. 10, p. 138–155, 2016.

TRAUTENMÜLLER, J. W. *Quantificação e distribuição do estoque de biomassa acima do solo em floresta estacional decidual*. 2015.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Biomassa e macronutrientes de uma floresta estacional decidual em Itaara-RS, Brasil. *Revista Árvore*, Universidade Federal de Viçosa, v. 37, n. 1, p. 99–105, 2013.

WANG, D. et al. Reconstructing stem cross section shapes from terrestrial laser scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2017.

WULDER, M. A. et al. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, v. 121, p. 196–209, 2012. ISSN 0034-4257.