



Estimativa de biomassa arbórea de regiões de mangue via escaneamento tridimensional a laser - comparação de métodos computacionais

Gisele G. Tavares

Thales L. R. Sabino

Gabriel H. C. Neves

Leonardo Goliatt

Flávia S. Bastos

giselegoulart@ice.ufjf.br

tluis@ice.ufjf.br

gabriel.neves2011@engenharia.ufjf.br

{leonardo.goliatt, flavia.bastos}@ufjf.edu.br

UFJF - Faculdade de Engenharia

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

Filipe O. Chaves

fochaves@gmail.com

UERJ - Faculdade de Oceanografia

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

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. Nesse contexto, equipamentos de escaneamento a laser podem ser usados para a determinação da biomassa de florestas e diversos estudos ressaltam a viabilidade. Nesse projeto é proposto a utilização de métodos computacionais para o cálculo do volume de fustes de árvores de florestas de mangues visando o cálculo da sua biomassa. Resultados satisfatórios foram encontrados até o momento, com perspectiva para auxílio de trabalhos em campo.*

Keywords: *Escaneamento a laser, Determinação de biomassa, Inventário florestal, Manguezal*

1 INTRODUÇÃO

A biomassa é a quantidade de matéria orgânica armazenada em uma região, e serve para determinar a quantidade de carbono estocada nessa área. A absorção e aprisionamento em biomassa de grandes quantidades de CO₂ presentes na atmosfera é chamado de Sequestro de Carbono. Esse processo é realizado principalmente por oceanos, florestas e organismos, que através da fotossíntese, usam a energia da radiação solar para converter dióxido de carbono em oxigênio. Esse conceito foi consagrado na conferência de Quioto de 1997, como um meio de reverter o acúmulo de CO₂ na atmosfera visando a diminuição do efeito estufa. O tronco de uma árvore tem em sua composição cerca de 80% de carbono (Kankare et al., 2013), portanto, por hectare, uma floresta tem potencial para sequestrar de 150 a 200 toneladas de CO₂ da atmosfera, em média. Isso torna as florestas um dos principais sequestradores de carbono do planeta. A quantificação do carbono sequestrado por uma floresta é, portanto, um assunto de extrema importância no âmbito de estudos envolvendo o clima do planeta.

O carbono sequestrado por um ecossistema é usualmente dividido em dois grandes reservatórios: Biomassa Acima do Solo, do inglês Above Ground Biomass (AGB) e Biomassa Abaixo do Solo, do inglês Below Ground Biomass (BGB). A determinação do BGB é feita extraíndo do local de estudo uma amostra do solo. Essa amostra é levada para laboratório de forma a determinar exatamente a quantidade de carbono presente. Um modelo que visa extrapolar essas medições é, então, estabelecido de forma a se ter uma aproximação do BGB para a floresta inteira. A determinação do AGB de uma floresta é feita de forma encontrar uma relação entre a estrutura e biomassa das árvores. Portanto é necessário a determinação dos aspectos estruturais das árvores presentes no ecossistema estudado. Algumas das medidas extraídas das árvores são o Diâmetro na Altura do Peito (DAP) e sua altura total (Segura and Kanninen, 2005; Mercker and Henning, 2011). Para encontrar os modelos de extrapolação da biomassa, amostras das árvores são colhidas e levadas para secagem e pesagem em laboratório. Uma relação entre a estrutura das árvores e a biomassa é estabelecida e extrapolada para toda a área de estudo. A biomassa total será a soma do BGB e AGB.

Florestas tropicais pantanosas contém material orgânico que pode ir até vários metros de profundidade e estão entre as maiores reservas orgânicas de carbono na biosfera terrestre. As turfeiras recebem uma atenção significativa desde 1997, quando incêndios associados a limpeza de terra na Indonésia aumentou a quantidade de CO₂ na atmosfera de 13% a 40% acima das emissões de combustíveis fósseis (Donato et al., 2011). O mesmo efeito vem sendo percebido com os manguezais. Porém, dados sobre as emissões de carbono resultante da perda de mangues são escassos. Manguezal é um ecossistema costeiro que ocorre em regiões tropicais e subtropicais do mundo ocupando as áreas entre marés, portanto pantanoso. É caracterizado por vegetação lenhosa típica, adaptada a ambientes com grande variação de salinidade, solo pouco oxigenado e frequente submersão pelas marés. As espécies de mangues possuem alto grau de especialização, apresentando adaptações no suporte mecânico das árvores, resistência à ação de marés, à salinidade e ao estresse hídrico. Quantificar o estoque de carbono das florestas de mangues é de suma importância, pois elas formam uma parte importante no ciclo do carbono classificando-as entre os ecossistemas mais produtivos (Donato et al., 2011). Uma característica marcante das florestas de mangue é sua alta plasticidade. Florestas com uma mesma composição de espécies podem apresentar desenvolvimento estrutural distinto. Isto significa que o mesmo ecossistema pode apresentar-se sob diferentes formas em regiões distintas. Essa diversidade estrutural apresentada pelas florestas de mangues torna este ecossistema particularmente difícil

de ser estudado por meios tradicionais de mapeamento de florestas.

A forma tradicional para determinar a quantidade de carbono armazenada numa floresta consiste em realizar medições de características estruturais que estão relacionadas com a biomassa. Essas medições envolvem trabalho de campo intensivo e custoso. Ao considerar os manguezais, o terreno desempenha um fator importante pois são locais, muitas vezes, de difícil acesso, difícil locomoção e de fauna diversificada. Com essa rápida descrição é possível perceber que o trabalho de determinar a biomassa de uma floresta é importante, porém demorado e custoso. Assim, encontrar uma maneira de reduzir o tempo necessário para determinar a biomassa de uma floresta é de grande interesse para pesquisadores da área de ecologia. Nesse contexto, técnicas de perfilamento a laser vêm sendo empregadas para reduzir o tempo e custo no estudo de florestas. Porém o emprego desse tipo de técnica no estudo de mangues é recente (Feliciano et al., 2014).

O LiDAR, 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 o mapeamento de uma área grande de floresta em questão de horas. O resultado do mapeamento é uma nuvem de pontos 3D 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 é mostrado na Fig. 1. O barateamento e aumento da precisão de escâneres tridimensionais os torna a ferramenta ideal para mapear grandes áreas de florestas para estudo in silico. O processamento da nuvem de pontos resultante do escaneamento tridimensional de uma área de floresta pode permitir a determinação automática de parâmetros de difícil medição manual como o volume do fuste.

O uso de escâneres 3D para a aferição de características florestais, apesar de relativamente recente, tem se mostrado promissor. Técnicas de sensoriamento remoto podem ser úteis para a aquisição de características relativas ao habitat de animais silvestres, mapeamento para prevenção de incêndios em grandes áreas e estimativa de biomassa, como relatado por Kelly et al. (2015). Xu et al. (2013) e Tao et al. (2014) comparam métodos tradicionais para medição de parâmetros estruturais das árvores com estimativas obtidas através de dados tridimensionais. O desenvolvimento de novos métodos para alcançar resultados adequados vem sendo estudado por Srinivasan et al. (2015), que conjuntamente investiga a influência das configurações do escâner na coleta de dados. Markku et al. (2015) emprega geometrias primitivas como cilindro e cone circulares para modelar fustes, realizando testes em objetos que simulam dados de TLS, do inglês *Terrestrial Laser Scanner*.

Este artigo tem como objetivo a utilização de métodos computacionais para estimar, a partir do escaneamento com laser terrestre, o volume de fustes de árvores de florestas de mangues no campo de estudos experimentais do Núcleo de Estudos em Manguezais (NEMA/UERJ) em Guaratiba, Rio de Janeiro.

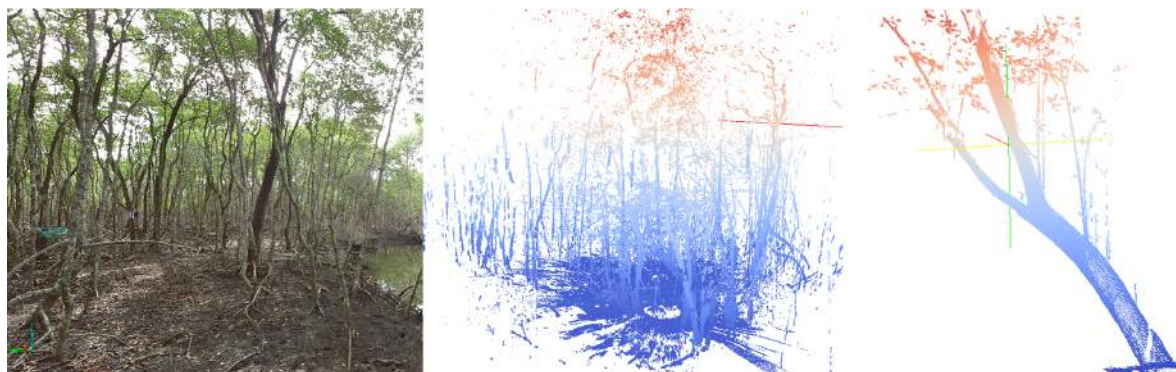


Figura 1: Manguezal, nuvem de pontos e árvore segmentada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estudo da área

A área de estudo (Fig.2) 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 km², sendo 20,9 km² de florestas de mangue e 7,4 km² 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.

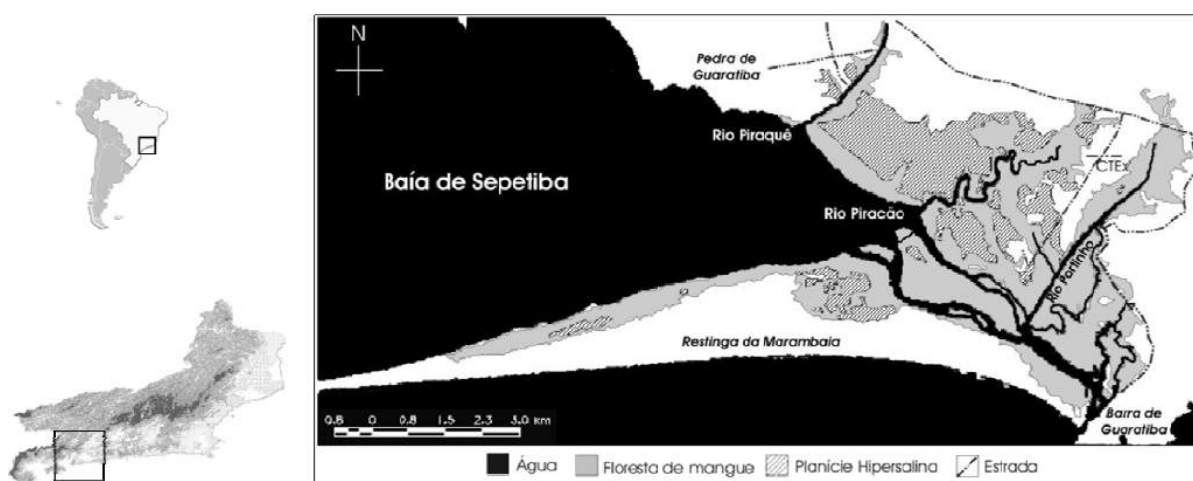


Figura 2: Visão geral da região de estudo.

2.2 Obtenção dos dados

Para o presente estudo foi escolhido o TLS FARO Laser Scanner Focus 3D, adequado para este tipo de área, que realiza uma leitura de 360° em torno de seu eixo horizontal e 305° em torno do eixo vertical, com demais características técnicas mostradas na Tabela 1. A varredura

ocorreu a partir de pontos fixos pré-estabelecidos para que houvesse uma representação satisfatória da região monitorada. Foram capturadas de 1 a 6 cenas e o software Scene, desenvolvido especificamente para o FARO Focus 3D, foi utilizado para o processamento das imagens e individualização das árvores. A representação tridimensional da estrutura arbórea com diversas leituras permite a análise dos melhores ajustes em relação ao número de cenas capturadas.

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

Foram escaneadas 8 árvores da RBG, sendo 5 delas de Mangue vermelho (*Rhizophora mangle*) e 3 de Mangue preto (*Avicennia schaueriana*), como mostrado na Tabela 2. Os indivíduos foram digitalizados por completo, e após o processamento, informações referentes ao fuste foram extraídas. Este procedimento foi realizado por conta da maior parte da biomassa estar localizada nessa área, e além disso o tratamento de folhas e galhos pequenos ser computacionalmente mais custoso.

Tabela 2: Relação das espécies estudadas

Rótulo	Espécie
7	<i>Avicennia schaueriana</i>
13	<i>Avicennia schaueriana</i>
81	<i>Rhizophora mangle</i>
82	<i>Rhizophora mangle</i>
83	<i>Rhizophora mangle</i>
94	<i>Avicennia schaueriana</i>
95	<i>Rhizophora mangle</i>
99	<i>Rhizophora mangle</i>

2.3 Métodos

Geometrias conhecidas foram geradas computacionalmente a fim de validar a metodologia, simulando alguns fustes encontrados em manguezais. Os objetos 3D utilizados foram cilindros com 15°, 30° e 45° de inclinação para testar e determinar a acurácia dos métodos.

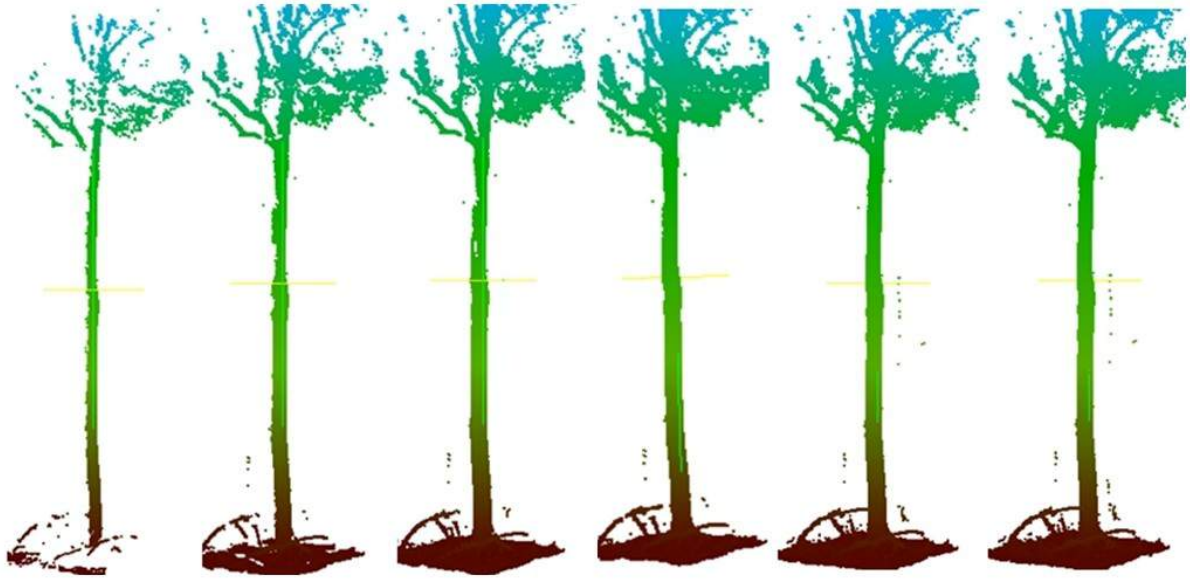


Figura 3: Comparação do número de leituras (1 leitura na extrema esquerda até 6 leituras na extrema direita) realizadas no indivíduo 94 da RBG. Conforme o aumento das cenas é possível ver de maneira mais detalhada a estrutura da árvore, com nuvens de pontos visualmente semelhantes para 4, 5 e 6 leituras.

Para o cálculo do volume de cada objeto geométrico utilizaremos o método de Smalian, que consiste em dividir o conjunto de dados traçando planos transversais no sentido de seu comprimento, e calcular a área das extremidades de cada seção. Após este processo, é calculado o somatório dos volumes das seções, de acordo com a Eq. 1 (Cabacinha, 2003).

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{(A_i + A_{i+1})}{2} \Delta h \quad (1)$$

em que, para cada seção: A_i e A_{i+1} correspondem às áreas das extremidades; Δh se refere ao comprimento.

Para avaliação dos resultados, foram utilizados os seguintes critérios estatísticos: Erro Relativo (ER), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM) e média das diferenças absolutas (MDA).

$$ER(\%) = 100 \frac{|\hat{Y} - Y|}{Y} \quad (2)$$

$$RQEM(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2} \quad (3)$$

$$MDA = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \right) \quad (4)$$

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.

ER e RQEM permitem a análise da proximidade do valor estimado ao real, enquanto a MDA fornece a idéia de amplitude dos erros.

Após cada cilindro ser dividido em seções transversais, círculos, elipses e splines foram

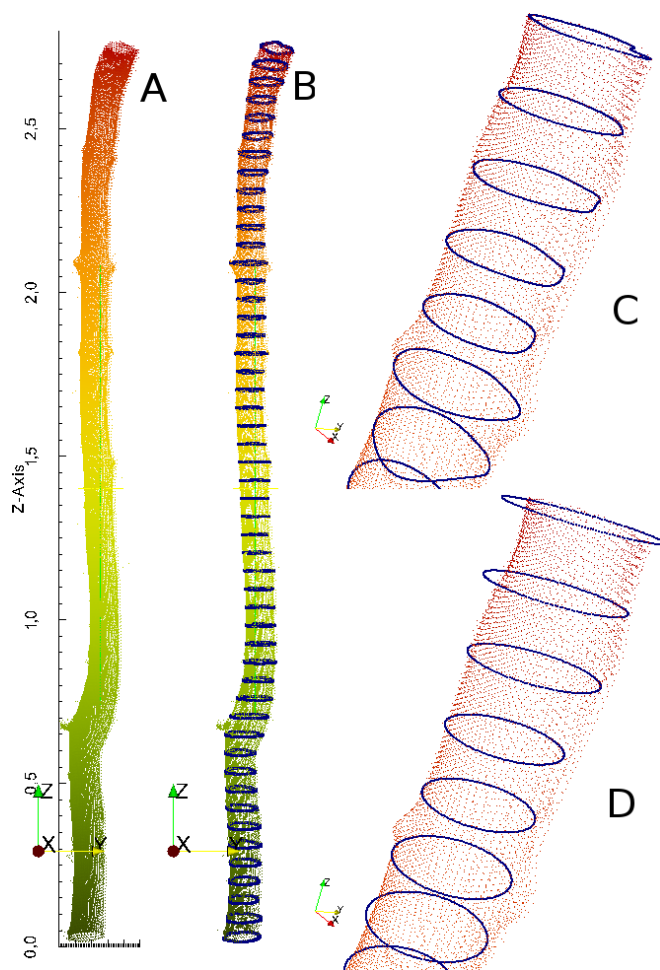


Figura 4: Esquemática da metodologia computacional. (A) nuvem de pontos do fuste extraído de um indivíduo da área de estudo, (B) ajuste de seções equidistantes ao longo do fuste e (C-D) comparação dos ajustes de círculos e splines.

modelados pelo algoritmo para o cálculo do volume. Os ajustes dos círculos e elipses acontecem de forma semelhante, o algoritmo processa cada seção da nuvem de pontos e determina a melhor posição para a curva que as descreva. Para as splines, polinômios são aproximados de acordo com a posição dos dados e uma curva que melhor os represente é traçada.

3 RESULTADOS

Para os cilindros de 15°, 30° e 45° gerados computacionalmente, foram realizados os ajustes de círculos, elipses e splines para validação. Usando o método de Smalian, o algoritmo estima os valores dos volumes e os compara com o encontrado utilizando a fórmula convencional (Eq. 5) para o cálculo do volume

$$V = \pi r^2 h \quad (5)$$

onde r é raio da base e h é a altura do cilindro. Comportamentos semelhantes foram observados para os três métodos, como pode ser visto na Tabela 3, que apresenta os volumes e os erros para cada um deles.

Tabela 3: Volumes estimados e erros para os cilindros inclinados gerados via computador. Os erros foram calculados comparando os valores encontrados com o esperado 0.0314159 m^3 .

Inclinação	Método	Estimado (m^3)	Erro (%)
15°	Círculo	0.0310914	1.03
	Elipse	0.0311030	0.99
	Spline	0.0310281	1.23
30°	Círculo	0.0310879	1.04
	Elipse	0.0311040	0.99
	Spline	0.0310434	1.19
45°	Círculo	0.0310968	1.01
	Elipse	0.0311054	0.99
	Spline	0.0310487	1.17

As estimativas foram próximas da realidade, conforme Fig.5, resultando em baixos valores de erro relativo, RQEM e MDA (Tabela 4), tornando os resultados mais confiáveis. Pelas características geométricas dos cilindros, círculos e elipses apresentam vantagens em relação aos ajustes das splines, comportamento que pode não ser observado utilizando outras geometrias.

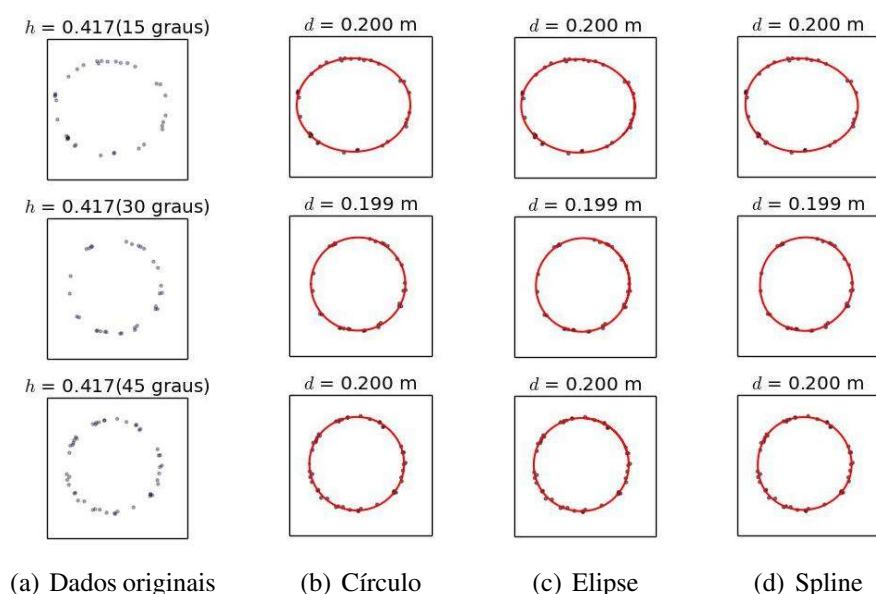


Figura 5: Comparação dos ajustes feitos pelo algoritmo. Na primeira, segunda e terceira linha são apresentados os dados referentes a uma seção dos cilindros com 15° , 30° e 45° de inclinação respectivamente. Os pontos em azul representam as informações originais e em vermelho são apresentados os ajustes realizados.

Os conjuntos de dados provenientes do escaneamento tridimensional de espécies do tipo Mangue Vermelho (*Rhizophora mangle*) e de Mangue Preto (*Avicennia schaueriana*) foram processados. As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os volumes dos fustes das árvores estudadas

Tabela 4: Medidas de precisão para cada um dos métodos. Os cálculos foram realizados usando os valores ajustados para os cilindros e o volume esperado 0.0314159 m^3 .

Método	RQEM ($\cdot 10^{-4}\%$)	MDA ($\cdot 10^{-4}\%$)
Círculo	3.3748	3.2387
Elipse	3.1250	3.1177
Spline	4.5580	3.7583

utilizando a aproximação de círculos, elipses e splines, respectivamente.

Tabela 5: Resultados da aproximação com o uso de círculos do volume dos fustes em m^3 . Nas linhas são apresentados os valores ajustados para cada árvore, e organizados nas colunas de acordo com o número de cenas utilizadas. No indivíduo 81 não foi possível o ajuste com 1 leitura por apresentar quantidade insuficiente de dados.

Árvore	Número de leituras					
	1	2	3	4	5	6
7	0.341	0.354	0.312	0.307	0.301	0.300
13	0.053	0.055	0.053	0.053	0.052	0.052
81	-	35506.004	0.027	0.023	0.024	0.024
82	142192.108	16225.561	0.026	0.024	0.072	0.043
83	0.050	0.034	0.027	0.023	0.021	0.024
94	0.292	0.311	0.311	0.305	0.297	0.295
95	0.033	0.034	0.037	0.049	131964.067	0.032
99	0.043	0.027	0.025	0.024	0.021	0.022

Pode-se observar que os ajustes com o uso de splines ficam, na maior parte das vezes, com valores abaixo dos encontrados nos dois métodos restantes. Ao contrário dos círculos e elipses, que ajustam curvas pré-determinadas em torno do conjunto de dados correspondente a uma seção do fuste, para as splines polinômios são determinados, fazendo com que a curva se aproxime melhor aos pontos.

Alguns valores incoerentes são apresentados na tabela referente ao ajuste de círculos por conta do algoritmo ainda não enxergar bifurcações ou galhos ao lado dos indivíduos, como ilustrado na Fig.6, fazendo com que figuras equivocadas sejam ajustadas. Em certos casos os ajustes não são realizados por haver número insuficiente de pontos ou pelos dados formarem uma figura desconexa. A funcionalidade de reconhecer mais troncos ainda não está implementada, sendo um dos trabalhos futuros.

Tabela 6: Resultados da aproximação com o uso de elipses do volume dos fustes em m^3 . Nas linhas são apresentados os valores ajustados para cada árvore, e organizados nas colunas de acordo com o número de cenas utilizadas. No indivíduo 81 não foi possível o ajuste com 1 leitura por apresentar quantidade insuficiente de dados.

Árvore	Número de leituras					
	1	2	3	4	5	6
7	0.361	0.302	0.309	0.309	0.302	0.301
13	0.049	0.050	0.052	0.053	0.053	0.053
81	-	0.012	0.016	0.022	0.023	0.023
82	0.013	0.014	0.017	0.017	0.016	0.016
83	0.018	0.019	0.016	0.019	0.021	0.023
94	0.343	0.298	0.302	0.303	0.295	0.294
95	0.009	0.010	0.009	0.008	0.014	0.016
99	0.008	0.023	0.021	0.020	0.021	0.022

Tabela 7: Resultados da aproximação com o uso de splines do volume dos fustes em m^3 . Nas linhas são apresentados os valores ajustados para cada árvore, e organizados nas colunas de acordo com o número de cenas utilizadas. No indivíduo 81 não foi possível o ajuste com 1 leitura por apresentar quantidade insuficiente de dados.

Árvore	Número de leituras					
	1	2	3	4	5	6
7	0.175	0.214	0.260	0.270	0.290	0.292
13	0.030	0.039	0.049	0.050	0.051	0.051
81	-	0.013	0.015	0.021	0.022	0.023
82	0.011	0.011	0.013	0.015	0.017	0.017
83	0.012	0.015	0.015	0.018	0.020	0.022
94	0.176	0.214	0.261	0.284	0.291	0.290
95	0.011	0.011	0.010	0.010	0.012	0.010
99	0.007	0.016	0.016	0.016	0.020	0.022

4 CONCLUSÕES

O uso de TLS para a aquisição dos dados na área de estudo se mostrou eficiente, pois as nuvens de pontos representaram de maneira satisfatória a estrutura das árvores. Esta técnica apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionais, pois aliada ao algoritmo desenvolvido para aproximar a biomassa de fustes, reduz os trabalhos em campo. Os baixos valores

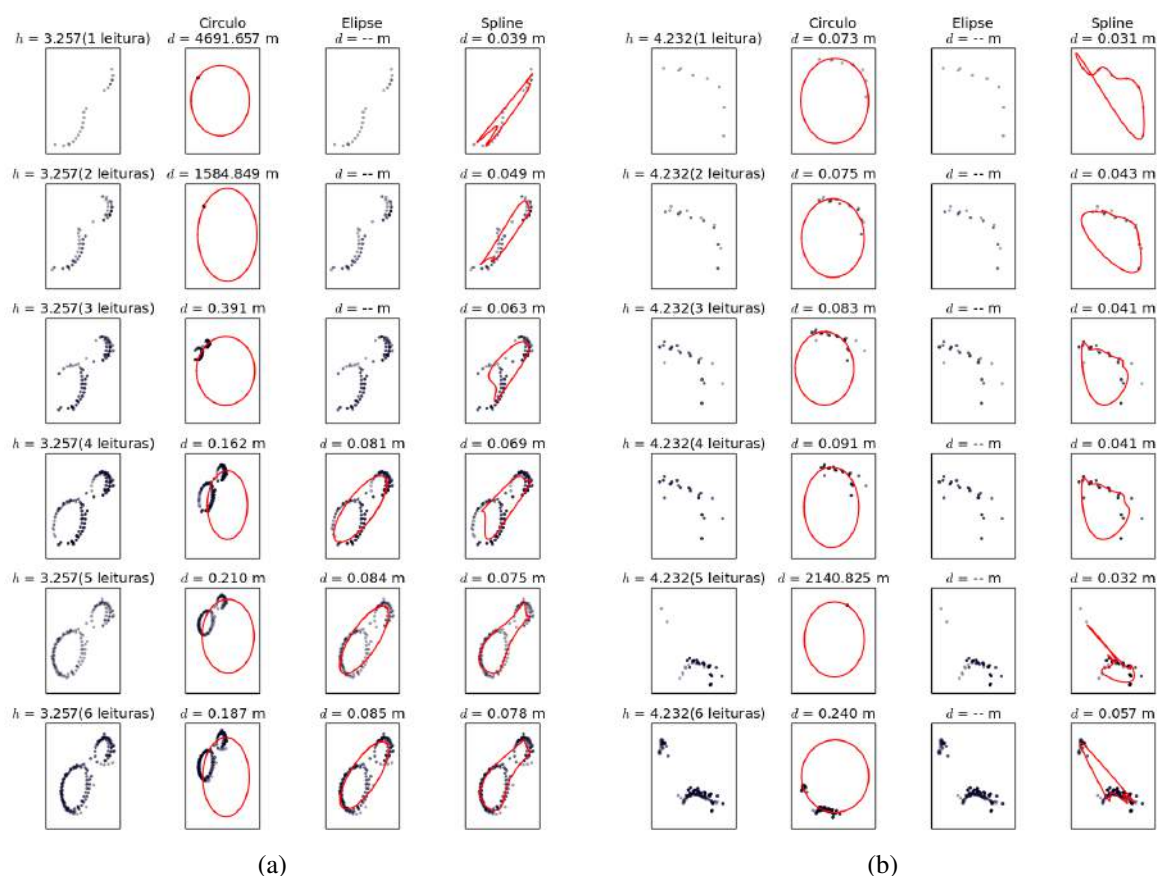


Figura 6: Ajustes em uma seção do indivíduo 82 (a) e do indivíduo 95 (b). Alguns ajustes não foram realizados por conta dos dados formarem uma figura desconexa ou por existir mais de um tronco. Esta funcionalidade será implementada futuramente.

das medidas de precisão nos testes realizados para a validação, demonstram que a metodologia funciona e pode ser aplicada para o cálculo do volume dos fustes de diferentes espécies.

Está sendo desenvolvida a possibilidade de detecção de ramificações, a fim de obter um melhor resultado na aplicação dos métodos. A aproximação de outros parâmetros estruturais como DAP, altura e área de sombra serão implementados futuramente, assim como a adequada relação entre número de leituras e qualidade dos ajustes.

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 ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica QUALIDADE AMBIENTAL NO CAMPUS/UFJF pela concessão da bolsa, à FAPEMIG (PCE-01337-15) e à CAPES através do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (Procad 071/2013) pelo auxílio financeiro, ao Núcleo de Estudos em Manguezais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e ao Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio.

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.
- Cabacinha, C. D. (2003). Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa. Master's thesis, Universidade Federal de Lavras.
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., and Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5):293–297.
- 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.
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H., and Alho, P. (2013). Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *{ISPRS} Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75:64 – 75.
- Kelly, M., Di Tommaso, S., et al. (2015). Mapping forests with lidar provides flexible, accurate data with many uses. *California Agriculture*, 69(1):14–20.
- Markku, Å., Raumonon, P., Kaasalainen, M., and Casella, E. (2015). Analysis of geometric primitives in quantitative structure models of tree stems. *Remote Sensing*, 7(4):4581–4603.
- Mercker, D. C. and Henning, J. G. (2011). Forestry 101:conducting a simple timber inventory. *Tree Farmer*, page 30.
- Segura, M. and Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in costa rica. *Biotropica*, 37(1):2–8.
- Srinivasan, S., Popescu, S. C., Eriksson, M., Sheridan, R. D., and Ku, N.-W. (2015). Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. *Remote Sensing*, 7(2):1877–1896.
- Tao, S., Guo, Q., Li, L., Xue, B., Kelly, M., Li, W., Xu, G., and Su, Y. (2014). Airborne lidar-derived volume metrics for aboveground biomass estimation: A comparative assessment for conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198:24–32.
- Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., and Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121:196–209.

Xu, W., Su, Z., Feng, Z., Xu, H., Jiao, Y., and Yan, F. (2013). Comparison of conventional measurement and lidar-based measurement for crown structures. *Computers and electronics in agriculture*, 98:242–251.