



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Tatiane Costa da Matta

**Utilização do escaneamento a laser terrestre nos manguezais da reserva
biológica estadual de Guaratiba, Rio de Janeiro - RJ**

Rio de Janeiro

2025

Tatiane Costa da Matta

**Utilização do escaneamento a laser terrestre nos manguezais da reserva biológica
estadual de Guaratiba, Rio de Janeiro - RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos oceanográficos na interface continente-oceano.

Orientador: Prof. Dr. Mário Luiz Gomes Soares

Coorientador: Prof. Dr. Filipe de Oliveira Chaves

Rio de Janeiro

2025

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTCC

M435 Matta, Tatiane Costa da.
 Utilização do escaneamento a laser terrestre nos manguezais da reserva
 biológica estadual de Guaratiba, Rio de Janeiro – RJ / Tatiane Costa da
 Matta.– 2024.
 83 f. : il.

 Orientador: Mário Luiz Gomes Soares.
 Coorientador: Filipe de Oliveira Chaves.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
 Faculdade de Oceanografia.

 1. Oceanografia - Teses. 2. Manguezais – Teses. 3. Ecossistemas - Teses.
 4. Florestas – Teses. 5. Gestão ambiental – Teses. I. Soares, Mário Luiz
 Gomes. II. Chaves, Filipe de Oliveira. III. Universidade do Estado do Rio
 de Janeiro. Faculdade de Oceanografia. IV. Título.

 CDU: 551.46(815.3)

Bibliotecária Responsável: Priscila Freitas Araujo/ CRB-7: 7322

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Tatiane Costa da Matta

**Utilização do escaneamento a laser terrestre nos manguezais da reserva biológica
estadual de Guaratiba, Rio de Janeiro – RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos oceanográficos na interface continente-oceano.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2025.

Banca Examinadora: _____

Prof. Dr. Mário Luiz Gomes Soares (Orientador)

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof. Dr. Filipe de Oliveira Chaves (Coorientador)

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof.^a Dr.^a. Claudia Hamacher

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Prof.^a Dr.^a. Paula Maria Moura

Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro

2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a vida e memória de Maristela Lopes.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, pois sem sua benção e o suprimento de forças a cada dia, nada disso seria possível. Em segundo lugar agradeço a meus pais por sempre estarem ao meu lado dando todo suporte que precisasse. A toda minha família, minha base. Agradeço imensamente ao meu marido João Gabriel, incansável nos esforços de não me deixar abater ou desistir. Te amo demais.

A tia Tela, uma inspiração como pessoa e profissional. Um exemplo a ser seguido e agora uma memória muito querida e cheia de saudade. Sua inteligência e vivacidade vão nos acompanhar pra sempre. Obrigada por tudo e por tanto.

Aos meus queridos amigos Fabi, Yolanda e Lucas, afogados, que continuam comigo desde os primórdios.

A todos do NEMA, Qualitec (Vitor), Yasmin, Hélio, Kiwi, Thalya, Laiza, André, Bernardo, Dudu, Dave, Rafaela, Davi, Mariana, Clara e Bruna. Aos que não vejo com frequência mas sempre fizeram parte da minha jornada, Michele, Brunna, Nara, Dani, Rita, Carol, Carla e Marciel. Muito obrigado pelo acolhimento e por me estenderem a mão sempre que foi necessário, pela parceria e principalmente por deixar os dias na UERJ mais leves e alegres.

Um agradecimento especial a Yasmin, por se dedicar ao processamento de dados e me auxiliar em tudo que fosse possível. Você me salvou em vários momentos. Grata!

Ao meu amigo querido Lucas, um obrigado especial por sempre me ensinar tanto, incentivar, aconselhar e direcionar. Certamente sem seu auxílio e carinho eu não estaria aqui. OBRIGADA por tudo.

Ao meu orientador, Dr. Mário Soares, por toda atenção e dedicação ao me orientar, por dividir um pouco de toda sabedoria que carrega, pelo empenho pra que tudo pudesse ser finalizado da melhor forma possível e por ser tão presente durante essa caminhada. Sou extremamente grata.

Ao meu coorientador, Dr. Filipe Chaves, que desde a orientação da monografia me acompanha e segura a minha mão para o desenvolvimento desta pesquisa. Sou muito grata por todo o direcionamento, aprendizado e incentivo que me deu. Foram muitos os momentos que pensei em desistir, mas nossas reuniões me davam fôlego e me faziam acreditar que era possível. Muito Obrigada.

Me sinto privilegiada pela orientação que me deram, a importância de vocês nessa caminhada é imensa.

Às professoras Dr. Cláudia Hamacher e Dr Paula Maria Moura, agradeço a disponibilidade, atenção e por não soltarem a minha mão durante todo o processo da dissertação. Obrigada pelos direcionamentos durante os seminários, foram de extrema importância. Vocês são um grande exemplo para mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de fomento.

Ao Instituto Estadual do Ambiente (INEA), responsável pela Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, por autorizar os estudos nos manguezais da região.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) de Guaratiba, pelo auxílio na logística de campo.

À secretaria do PPGOCN, pela gentileza de sempre e auxílio de forma excepcional.

Obrigada, de coração!

“Quando você tem medo e faz mesmo assim, isso é coragem.”

Coraline, Neil Gaiman.

RESUMO

MATTA, Tatiane Costa da. **Utilização do escaneamento a laser terrestre nos manguezais da reserva biológica estadual de Guaratiba, Rio de Janeiro – RJ**. 2025. 83 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Manguezal é um ecossistema costeiro tropical que possui vegetação típica com contornos próprios. A obtenção manual dos parâmetros estruturais nesse ambiente é difícil e trabalhosa e o escaneamento terrestre a laser (TLS) é uma alternativa para otimizar a coleta de dados. A varredura pode ser dificultada por razões externas como clima e disposição das árvores e erros comumente encontrados na metodologia do escaneamento a laser que são: nuvem de pontos, deformação do tronco ou altura do DAP. O objetivo deste estudo é testar a utilização do TLS para determinação de parâmetros estruturais em florestas de mangue, por meio da comparação com o método tradicional de levantamento fitossociológico. Para isso, foi feito o escaneamento de 14 estações nos manguezais da Reserva Biológica Estadual de Guaratiba – RJ, sendo, seis de florestas bem desenvolvidas (Franja), seis de florestas de desenvolvimento intermediário (Bacia) e duas de florestas de desenvolvimento arbustivo (Transição). Através dos resultados obtidos, é possível observar que para Franja e Bacia os dados apresentam pouca discrepância entre os métodos, sendo possível observar as mesmas características de desenvolvimento estrutural das florestas. Os valores do MAPE (Erro Percentual Absoluto Médio) para florestas de franja foram de 7,39% para o DAP médio, 13,92% para altura média. Já utilizando o RMSE (Raiz quadrada do Erro Quadrático Médio) e RMSE %, os valores obtidos foram de 1,17cm (8,92%) para o DAP médio, 2,09 m (19,57%) para altura média. Nas florestas de bacia os valores do MAPE foram de 4,67 % para o DAP médio, 6,33 % para altura média. Já utilizando o RMSE e RMSE %, os valores obtidos foram de 0,38cm (5,18%) para o DAP médio, 0,39 m (6,66%) para altura média. Na transição os valores do MAPE foram de 10,43% para o DAP médio, 8,52% para altura média. Já utilizando o RMSE e RMSE %, os valores obtidos foram de 0,42cm (12,6%) para o DAP médio, 0,38 m (12,9%) para altura média. Além dos parâmetros citados, Densidade (troncos vivos.ha⁻¹) e Área Basal (m².ha⁻¹) também foram testados e os valores obtidos pelo método TLS apresentaram valores satisfatórios quando comparados ao método de referência.

Palavras-chave: escaneamento a laser terrestre; TLS; manguezal; floresta de mangue; tipos fisiográficos; ecologia florestal; parâmetros estruturais.

ABSTRACT

MATTA, Tatiane Costa da. **Use of terrestrial laser scanning in the mangroves of Guaratiba state biological reserve, Rio de Janeiro – RJ.** 2025. 83 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Mangroves are tropical coastal ecosystems with typical vegetation and their own contours. Manually obtaining structural parameters in this environment is difficult and laborious, and terrestrial laser scanning (TLS) is an alternative to improve and optimize data collection. Scanning can be difficult due to external factors such as climate and tree arrangement, and errors commonly found in laser scanning methodology, such as point clouds, trunk deformation or DBH height. The objective of this study is to test the use of TLS to determine structural parameters in mangrove forests, by comparing it with the traditional phytosociological survey method. The objective of this study is to determine the best method and solutions for using TLS in mangroves, validated through the comparison of both methods used. To achieve this, scans were conducted at 14 stations in Guaratiba State Biological Reserve (GSBR) in Rio de Janeiro municipality, including six stations in well-developed forests (Fringe), 6 in forests with intermediate development (Basin-Multstemmed), and two in scrub forests (Transition). Data were collected using both traditional and TLS methods in all stations. The results show that for Fringe and Basin forests, the data present little discrepancy between the methods, allowing the observation of similar structural development characteristics in these forests. The MAPE values for fringe forests were 7.39% for mean DBH and 13.92% for mean height. Using RMSE and RMSE%, the values obtained were 1.17 cm (8.92%) for mean DBH and 2.09 m (19.57%) for mean height. For basin forests, the MAPE values were 4.67% for mean DBH and 6.33% for mean height. Using RMSE and RMSE%, the values were 0.38 cm (5.18%) for mean DBH and 0.39 m (6.66%) for mean height. In transition forests, the MAPE values were 10.43% for mean DBH and 8.52% for mean height. Using RMSE and RMSE%, the values were 0.42 cm (12.6%) for mean DBH and 0.38 m (12.9%) for mean height. In addition to the parameters mentioned, Density (live trunks.ha⁻¹) and Basal Area (m².ha⁻¹) were also tested and the values obtained by the TLS method showed satisfactory values when compared to the reference method.

Keywords: terrestrial laser scanning; mangrove; mangrove forest; physiographic types; forest ecology; structural parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Varredura a laser em diferentes plataformas, na escala em que podem ser utilizadas e seu nível de resolução. Tripé; Mobile; Drone; Avião e Satélite respectivamente.....	18
Figura 2 –	Área de estudo na Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, Rio de Janeiro - RJ. Em detalhes as parcelas permanentes monitoradas pelo NEMA e utilizadas no presente estudo.....	29
Figura 3 –	Imagem do laser Scanner. Aparelho FARO Focus 3D S70 utilizado no presente estudo.....	35
Figura 4 –	Alvos planos em material de ACM (Aluminium Composite Material)	37
Figura 5 –	Alvos esféricos de material retroreflexivo com fitas coloridas.	37
Figura 6 –	Posicionamento estratégico dos alvos esféricos e planos nas florestas de mangue estudadas em Guaratiba para minimizar as oclusões na área.....	39
Figura 7 –	Estação de varredura a laser em floresta de transição em Guaratiba com a separação em fileiras fileiras com trena amarela.....	42
Figura 8 –	Alvos esféricos com fitas coloridas para facilitar sua visualização.....	43
Figura 9 –	Esquema da metodologia utilizada para escaneamento da floresta de transição baseada em Wilkes, et al., (2017). Os alvos esféricos estão representados em diferentes cores no esquema; o tripé representa o posicionamento do scanner ao longo das faixas.....	43
Figura 10 –	Dados de referência gerados pelos softwares para montagem de nuvem de pontos. (A) métricas de erro do registro (ou “alinhamento”) dos dados de nuvem de pontos. No programa SCENE 3D POINT CLOUD (b) métricas de erro usadas para avaliar a qualidade do registro (ou sobreposição) das nuvens de pontos no programa RECAP PRO.....	46

Figura 11 –	Parâmetros estruturais da floresta de franja nas estações estudadas no manguezal de Guaratiba obtidos pelo método tradicional (barra cinza pontilhada) e pelo método TLS (barra branca pontilhada)	50
Figura 12 –	Comparação do método TLS em relação às estimativas dos valores de referência (método tradicional) para os parâmetros estruturais: (a) DAP médio (cm), (b) Altura média (m), (c) Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹) e (d) Área basal (m ² .ha ⁻¹), para as florestas de franja. A linha tracejada representa a relação 1:1, e a linha sólida vermelha indica o ajuste linear não considerando os outliers (indicados por quadrados)	53
Figura 13 –	Parâmetros estruturais das estações das florestas de bacia do manguezal de Guaratiba obtidas pelo método tradicional (cinza pontilhada) e pelo método TLS (branca pontilhada): DAP médio (cm); altura média (m); densidade (tr.vivos.ha.-1) e área basal (m ² .ha ⁻¹)	55
Figura 14 –	Comparação do método TLS em relação às estimativas dos valores de referência (método tradicional) para os parâmetros estruturais nas florestas de bacia de Guaratiba: (a) DAP médio (cm), (b) Altura média (m), (c) Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹) e (d) Área basal (m ² .ha ⁻¹). A linha tracejada representa a relação 1:1, e a linha sólida vermelha indica o ajuste linear não considerando os outliers (indicados por quadrados)	58
Figura 15 –	Parâmetros estruturais das estações das florestas de transição do manguezal de Guaratiba obtidas pelo método tradicional (cinza pontilhada) e pelo método TLS (branca pontilhada): DAP médio (cm); altura média (m); densidade (tr.vivos.ha.-1) e área basal (m ² .ha ⁻¹)	60
Figura 16 –	Comparação do método TLS em relação às estimativas dos valores de referência (método tradicional) para os parâmetros estruturais das florestas de mangue de Guaratiba: (a) DAP médio (cm), (b) altura média (m), (c) densidade (troncos vivos.ha ⁻¹) e (d) área basal (m ² .ha ⁻¹). A linha tracejada	

representa a relação 1:1, e a linha sólida vermelha indica o ajuste linear não considerando os outliers (indicados por quadrados) 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros estruturais medidos a partir do método tradicional.....	31
Tabela 2 –	Número de escaneamentos e tempo total para coleta de dados nas parcelas em floresta de franja do manguezal de Guaratiba.....	39
Tabela 3 –	Número de escaneamentos e tempo total para coleta de dados de na floresta de transição do manguezal de Guaratiba.....	40
Tabela 4 –	Número de escaneamentos e tempo total para coleta de dados na floresta de transição do manguezal de Guaratiba.....	42
Tabela 5 –	Softwares utilizados para criação e tratamento de dados nas florestas de franja, bacia e transição.....	47
Tabela 6 –	Parâmetros estruturais obtidos a partir dos dados coletados pelo método tradicional e método TLS nas estações estudadas nas florestas de franja no manguezal de Guaratiba (RJ)	51
Tabela 7 –	Comparação dos parâmetros estruturais determinados pelo TLS e método tradicional, para as florestas de franja de Guaratiba a partir das métricas erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r)	52
Tabela 8 –	Parâmetros estruturais obtidos a partir de dados coletados pelo método tradicional e pelo método TLS nas florestas de bacia do manguezal de Guaratiba.....	56
Tabela 9 –	Comparação dos parâmetros estruturais pelo TLS e método tradicional a partir das métricas o erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R^2), para as florestas de bacia no manguezal de Guaratiba.....	57
Tabela 10 –	Parâmetros estruturais obtidos a partir de dados coletados pelo	

	método tradicional e pelo método TLS nas florestas de transição do manguezal de Guaratiba.....	61
Tabela 11 –	Comparação dos parâmetros estruturais pelo TLS e método tradicional a partir das métricas o erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%)......	62
Tabela 12 –	Comparação dos parâmetros estruturais pelo TLS e método tradicional, para as florestas de mangue de Guaratiba, a partir das métricas o erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R ²)	63
Tabela 13 –	Comparação dos parâmetros estruturais determinados pelo TLS e método tradicional a partir das métricas erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R ²), para as florestas de franja, bacia e transição no manguezal de Guaratiba.....	67

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	OBJETIVOS	20
1.1	Objetivo Geral	20
1.2	Objetivos Específicos	20
2	Fundamentação Teórica	21
2.1	Parâmetros Estruturais	21
2.2	Zonação	22
2.3	O Escaneamento a Laser Terrestre (TLS)	24
2.4	O TLS em diferentes tipos fisiográficos (franja, bacia e transição)	27
2.5	Oclusões	28
3	METODOLOGIA	29
3.1	Área de estudo	29
3.2	Método tradicional de caracterização fitossociológica	32
3.3	Descrição e configurações do instrumento utilizado	34
3.4	Método TLS e a coleta de dados	36
3.4.1	<u>Florestas de franja</u>	38
3.4.2	<u>Floresta de bacia</u>	40
3.4.3	<u>Florestas de transição</u>	41
3.5	Processamento dos dados	44
3.6	Análise Estatística	47
4	RESULTADOS	49
4.1	Florestas de Franja	49
4.2	Florestas de Bacia	54
4.3	Florestas de Transição	58
4.4	Florestas de Mangue	62
5	DISCUSSÃO	65
	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE	82

APÊNDICE A – Artigo relacionado a dissertação publicado em 22 de fevereiro de 2025	82
APÊNDICE B – Corrigendum do artigo “Evaluating terrestrial laser scanning for structural characterization of Mangrove forests in Southeastern Brazil” publicado em 20 de março de 2025.....	83

INTRODUÇÃO

Os manguezais podem ser descritos como ecossistemas costeiros, de transição entre ambientes terrestres e marinhos, ocorrendo em regiões tropicais e subtropicais, sujeitas ao regime das marés. São constituídos por espécies vegetais lenhosas típicas que ocupam áreas constantemente alagadas pelas marés, estando adaptadas à variabilidade de salinidade e caracterizadas por colonizarem sedimentos predominantemente lodosos. Sua ocorrência prevalece em regiões costeiras abrigadas e apresentam condições favoráveis para alimentação, proteção e reprodução de diversos organismos em diferentes fases de vida, o que torna o ecossistema um importante transformador de nutrientes em matéria orgânica e gerador de bens e de serviços (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995). Além disso, são eficientes protetores da linha de costa contra ventos, tempestades, inundações e eventos extremos, com uma significativa importância no controle de inundações (MUKHERJEE *et al.*, 2014).

Os manguezais são ecossistemas de extrema resiliência e mesmo que dependam de circunstâncias básicas, estão presentes em diversas localidades ao redor do globo. De acordo com o relatório "The State of the World's Mangroves 2024" (Leal e Spalding, 2024) a cobertura global dos manguezais abrange aproximadamente 147.256 km². A maior concentração desses ecossistemas encontra-se no Sudeste Asiático, que abriga cerca de um terço do total mundial, sendo a Indonésia o país com a maior área, representando 21% do total. Outros países de destaque em cobertura de manguezais incluem Brasil, Austrália, México e Bangladesh, que juntos concentram mais de 75% da área remanescente do ecossistema.

Algumas condições são básicas para o desenvolvimento dos manguezais como, temperatura média mensal superior a 20°C e amplitude térmica anual inferior a 5°C anual; substrato lamoso; precipitação pluvial acima de 1500 mm/ano, sem longos períodos de seca; grande amplitude de marés. Tais características foram descritas por Walsh (1974) e Chapman (1975) e definem sua ocorrência no globo, tendo a temperatura como principal fator limitante. Na costa brasileira, os manguezais estendem-se de 04° 20' N (Rio Oiapoque-AP) até 28° 28' S (Laguna-SC), estando, portanto submetidos a condições ambientais bastante diversas (SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 1990; SOARES *et al.*, 2012).

A variabilidade estrutural de florestas de mangue é resultado da ação de fatores ecológicos em diferentes escalas espaciais (TWILLEY *et al.*, 1998). Cada faixa costeira

apresenta, em uma escala geográfica menor, diversos ambientes geomorfológicos, onde a estrutura das florestas é caracterizada pela dominância relativa da ação de ondas, marés ou rios no sistema em questão (THOM, 1984). Em cada um dos ambientes, é possível analisar ainda a floresta de mangue em uma escala local, na qual a hidrologia e a topografia determinam a frequência de inundação pelas marés e de aporte fluvial, caracterizando os chamados “tipos fisiográficos de florestas de mangue” (LUGO & SNEDAKER, 1974).

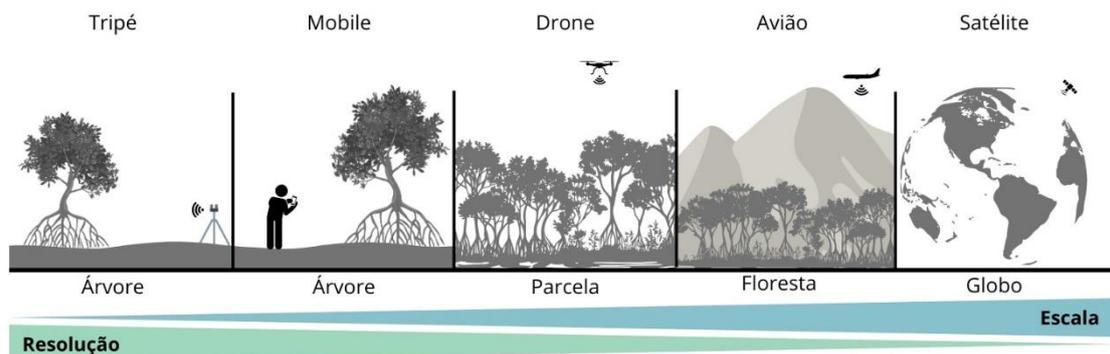
Sendo assim, os manguezais brasileiros apresentam diferentes características estruturais, decorrentes da diferença climática regional em que estão localizados e sua assinatura energética, conforme citado por Schaeffer-Novelli *et al.*, (1990) e Twilley (1995). Já no nível local, a hidrologia e a topografia determinam a frequência de inundação pelas marés e o aporte fluvial, moldando as florestas de mangue (LUGO & SNEDAKER, 1974). De acordo com esses autores, os manguezais podem ser classificados em cinco tipos fisiográficos: franja, ribeirão, ilhote, bacia e anão (ou arbustivo). Posteriormente, Schaeffer-Novelli *et al.*, (2000) resumiram os tipos fisiográficos em 3: franja, bacia e anão/arbustivo (ou transição, conforme proposto por Estrada *et al.*, 2013). As florestas de franja possuem características marcantes dentro dos manguezais, sendo mais desenvolvidas estruturalmente, mais lavadas pelas marés e expostas a menor estresse ambiental (LUGO; SNEDAKER, 1974).

De acordo com Cintrón e Schaeffer-Novelli (1983), as florestas de bacia correspondem a áreas de baixo relevo localizadas nas regiões mais interiores do manguezal, caracterizadas por níveis topográficos mais elevados e baixa renovação de água devido ao reduzido fluxo das marés. Essa condição ambiental resulta em um menor desenvolvimento estrutural em comparação às florestas de franja. As florestas de transição, também conhecidas como florestas de desenvolvimento arbustivo, ocorrem em áreas de condições ambientais mais rigorosas, como nas bordas de planícies hipersalinas ou regiões com baixa renovação de água.

Esses ambientes representam limites fisiológicos para as espécies de mangue, resultando em um desenvolvimento estrutural reduzido (ESTRADA, 2009). Com tantas particularidades, complexidades e características únicas, os estudos em áreas de manguezal evoluem de forma que possamos compreender todos os seus diferentes aspectos ao redor do mundo. Para isso, novas tecnologias têm sido introduzidas nesses estudos ao longo dos últimos anos. Dentre estas novas tecnologias, tem se destacado aquelas que se baseiam no escaneamento a laser ou LIDAR (Light detection and ranging), que é um método de

sensoriamento remoto utilizado para medições de distância ao emitir pulsos de laser (HENTZ, 2018). A tecnologia LIDAR pode apresentar-se de três tipos, sendo: orbital, aéreo (ALS – Aerial Laser Scanning), e terrestre (TLS - Terrestrial Laser Scanning) (Figura 1). A principal diferença entre eles está na plataforma que carrega o sensor laser, podendo variar desde tripés até satélites. Embora haja uma relação direta entre a área que pode ser efetivamente mapeada (escala) e a densidade de pontos obtida (resolução) pelos sistemas de sensores, acredita-se que o método de escaneamento a laser terrestre, conhecido em inglês como *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), seja uma ferramenta capaz não apenas de complementar os métodos tradicionais de caracterização das florestas, mas também de aprimorar a qualidade dos dados florestais.

Figura 1 – Varredura a laser em diferentes plataformas, na escala em que podem ser utilizadas e seu nível de resolução. Tripé; Mobile; Drone; Avião e Satélite respectivamente.



Fonte: A autora, 2024.

A crescente demanda por coletas de dados mais precisos e em maior volume tem impulsionado o uso dessa tecnologia ao longo das últimas décadas (XIA *et al.*, 2021), abrindo espaço para o desenvolvimento de novos métodos que contribuam para o avanço contínuo da técnica. Em resposta a essa demanda, nas últimas décadas, o escaneamento a laser terrestre (TLS) tem revolucionado o campo das medições estruturais de árvores (CALDERS *et al.*, 2020). Ele foi introduzido no início dos anos 2000 para caracterização e medições florestais básicas e demonstrou sua capacidade de medir com precisão altura e diâmetro em diferentes tipos de florestas como bosques de pinheiros (TANSEY *et al.*, 2009), florestas de eucalipto (CALDERS *et al.*, 2015) e florestas de mangue (PHAM *et al.*, 2019). No entanto, para florestas densas e estruturalmente complexas o TLS demanda maior atenção, pois pode vir a subestimar a altura do dossel devido ao seu ponto de vista e por conta da oclusão, muito

comum em florestas com essas características (ZHAO *et al.*,2023). Em outras palavras, essa tecnologia permitiu o estudo e a quantificação em grande escala da estrutura florestal, fornecendo parâmetros básicos como a altura do dossel (YU *et al.*, 2004). Entretanto, o ALS possui limitações em termos de densidade de pontos, o que restringe o alcance das medições estruturais de árvores individuais à altura e características apenas do dossel.

Assim, para que possamos utilizar os dados obtidos através do laser em florestas tropicais complexas como os manguezais, se faz necessário o estabelecimento de uma metodologia para o uso do TLS. Neste sentido, o presente estudo pretende apresentar uma metodologia funcional e específica para caracterização da estrutura de florestas de mangue e tendo como base os dados obtidos de acordo com o método tradicional para coleta de dados estruturais, pretende-se validar a utilização do método TLS para o monitoramento das florestas de mangue e pontuar suas vantagens e incertezas.

O estudo foi conduzido na Reserva Biológica Estadual de Guaratiba (RBG) e contém os ajustes necessários para cada tipo fisiográfico (Franja, Bacia e Transição), considerando-se as particularidades de cada uma destas florestas, além de demonstrar o melhor uso do aparelho (TLS) e seus acessórios para a obtenção de uma nuvem de pontos de melhor qualidade.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral consiste na validação do uso do escaneamento a laser terrestre na caracterização e monitoramento de manguezais, considerando-se a variabilidade ecológica das florestas de mangue.

1.2 Objetivos específicos

- a) Comparar os métodos TLS e Tradicional utilizando os parâmetros estruturais das florestas de mangue;
- b) Desenvolver o método de utilização do TLS aplicável a diferentes florestas de mangue;
- c) Validar a aplicação do TLS para diferentes florestas de mangue, tendo como base os tipos fisiográficos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Parâmetros Estruturais

Os parâmetros estruturais de uma floresta descrevem as características físicas e a organização das plantas no ecossistema. Portanto, compreendê-los em manguezais é essencial para avaliar sua saúde. Parâmetros como identificação das espécies e condição (vivo ou morto), altura dos indivíduos, diâmetro à altura do peito DAP (medido a 1,30 m do substrato) e área basal, são dados fundamentais para o monitoramento e manejo eficaz das florestas de mangue (CINTRÓN; SCHAEFFER-NOVELLI, 1984).

Os parâmetros estruturais variam significativamente em resposta a fatores ambientais, como salinidade, disponibilidade de nutrientes e regimes de maré. Estudos apontam que tais fatores influenciam diretamente a produtividade e a resiliência dos manguezais (KAUFFMAN; DONATO, 2012). Os estudos ainda revelam padrões de variação dos parâmetros estruturais em resposta a gradientes ambientais. Por exemplo, áreas com maior salinidade tendem a apresentar árvores menores, enquanto manguezais localizados em regiões de maior disponibilidade de nutrientes apresentam maior biomassa (TWILLEY *et al.*, 1992).

As parcelas demarcadas facilitam o estudo das características estruturais e da composição das florestas de mangue. Assim, é possível monitorar mudanças ao longo do tempo, compreender a dinâmica ecológica e desenvolver uma gestão mais eficaz diante de alterações ambientais, como mudanças climáticas ou impactos antropogênicos (ESTRADA, 2009). Parcelas podem auxiliar no melhor entendimento da área de estudo, permitem acompanhar o desenvolvimento das florestas ao longo do tempo por meio de medições continuadas de parâmetros estruturais. São utilizadas para o monitoramento e criadas com a finalidade de proporcionar uma amostra representativa da floresta onde se deseja acompanhar e avaliar seus processos ecológicos.

A parcela precisa ser uma demonstração da floresta, ou seja, seu interior precisa ter um número de árvores com características que representem a área de interesse, pois a partir dos dados coletados de seus indivíduos serão geradas interpretações de toda floresta. Significa dizer que a representatividade está diretamente relacionada ao número de árvores medidas, e

assim a parcela possui indivíduos de gênero, espécie, tamanhos e arquitetura semelhantes ao seu entorno. Lembrando que, quando as parcelas são criadas com a intenção de manter um monitoramento, a quantidade de árvores precisa ser suficiente para representar a área de estudo em uma série temporal, possibilitando o registro contínuo. Isso por que a floresta pode passar por um distúrbio e ter alterações bastante impactantes. E para que tais parâmetros sejam descritos corretamente, é indispensável que seja feito um planejamento amostral adequado e o monitoramento contínuo de parcelas permanentes de medição (SOARES, 1997).

Entretanto, como discutido neste estudo, existem desafios e incertezas associados aos métodos tradicionais (de referência) para medir a estrutura das árvores. A inclusão de novas tecnologias para o aprimoramento da coleta de estrutura pretende, além de agilizar o processo, trazer maior certeza principalmente na medição de parâmetros como a altura. Desde sua introdução para medições florestais básicas no início dos anos 2000, o TLS tem se destacado por sua capacidade de medir com precisão a altura e o diâmetro (DAP) das árvores em diferentes tipos de florestas. Estudos futuros devem integrar métodos tradicionais e tecnologias inovadoras para melhorar a precisão e a abrangência das análises, promovendo uma compreensão mais detalhada desses ecossistemas (DUKE *et al.*, 2007).

2.2 Zonação

A zonação em manguezais refere-se à organização espacial das espécies vegetais ao longo de gradientes ambientais específicos, moldados por fatores abióticos locais como salinidade, nutrientes, hidrologia e microtopografia (CINTRÓN; SCHAEFFER-NOVELLI, 1983; HUSTON, 1994). Essa organização reflete adaptações evolutivas das espécies às condições peculiares do ecossistema, resultando em substituições sucessivas de espécies ao longo de gradientes de salinidade, períodos de inundação e aporte de nutrientes (LUGO; SNEDAKER, 1974).

A salinidade exerce influência determinante, variando desde níveis baixos em águas doces até concentrações salinas superiores ao triplo da salinidade da água do mar em regiões áridas (CINTRÓN *et al.*, 1978). Essa variação condiciona o desenvolvimento estrutural e a arquitetura das espécies, que apresentam faixas ótimas de salinidade para seu crescimento, fora das quais ocorrem limitações fisiológicas como redução na troca gasosa (BALL, 1988;

KRAUSS *et al.*, 2008; SOARES *et al.*, 2017). Tais restrições, somadas às diferenças na tolerância à salinidade, influenciam a dominância de espécies e a composição das florestas de mangue em cada zona.

As florestas de mangue podem ser organizadas em três principais tipos fisiográficos: franja, bacia e transição.

Florestas de Franja: Localizadas em zonas de menor elevação e alta frequência de inundação pelas marés, essas florestas possuem os maiores DAP e alturas médias, mas baixa densidade de indivíduos, sendo consideradas estruturalmente desenvolvidas. Subtipos incluem: Ribeirinho e *Overwash*. As florestas ribeirinhas são marcadas por um maior aporte de água doce e nutrientes, o que favorece um desenvolvimento estrutural mais expressivo. Já as florestas *overwash* estão sujeitas a uma maior influência de energia eólica e ação de ondas, fatores que restringem o desenvolvimento estrutural dos indivíduos arbóreos (ESTRADA, 2009).

Florestas de Bacia: Situadas em níveis topográficos superiores, com menor frequência de inundação, apresentam árvores de porte menor que as de franja. Nessas áreas, ocorre frequentemente o desenvolvimento de troncos múltiplos (*multistemmed*), associado à adaptação das espécies às condições de inundação menos frequente e maior estresse hídrico (ESTRADA, 2009).

Florestas de Transição (Shrub ou Dwarf): Localizadas em regiões com limitação de nutrientes ou hipersalinas, essas florestas enfrentam condições ambientais mais rigorosas, resultando em desenvolvimento estrutural limitado, com árvores de porte reduzido, altamente ramificadas e densidade mais alta (ESTRADA, 2009).

Assim, os padrões de zonação em manguezais refletem o equilíbrio dinâmico entre fatores ambientais locais e as capacidades adaptativas das espécies, determinando a composição, dominância, estrutura e arquitetura da vegetação em cada zona (CINTRÓN; SCHAEFFER-NOVELLI, 1983; BALL, 1988; SOARES *et al.*, 2017).

2.3 O Escaneamento a Laser Terrestre (TLS)

A tecnologia *LASER* – (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) foi inventada no ano de 1960 por Theodore H. Maiman. Sua pesquisa foi inspirada em dois importantes acontecimentos do meio científico: a publicação de um artigo de Albert Einstein em 1917, que sugeria a emissão estimulada de radiação luminosa incentivando o desenvolvimento de amplificadores e osciladores; e a invenção do *MASER* – (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), em 1954, aparelho criado a partir das pesquisas realizadas durante a Segunda Guerra Mundial com *RADAR* -*Radio Detection and Ranging* (BRANDALIZE & PHILIPS, 2002).

Os equipamentos *laser scanner* terrestre fazem uso dessa tecnologia para obter distâncias com ampla precisão em relação a objetos. Como resultado, obtém-se uma nuvem de pontos tridimensional de alta densidade, que pode ultrapassar milhões de pontos com apenas alguns minutos de coleta. Esse potencial pode ser explorado para a captura rápida e precisa de dados extremamente detalhados, com uma ampla variedade de aplicações em áreas como florestas, mineração, transportes, planejamento urbano e muitas outras (LICHTI; PFEIFER e MAAS, 2008).

O TLS tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a ecologia florestal. Inicialmente aplicado em florestas temperadas e tropicais, sua utilização expandiu-se para estudos de ecossistemas florestais mais complexos, como os manguezais. Essa tecnologia tem se mostrado promissora ao mapear características estruturais das florestas com um nível de detalhamento elevado, tornando-se um método valioso para estudos ecológicos (TAVARES *et al.*, 2016). Combina alta capacidade de captura de dados — até um milhão de pontos por segundo e mais de 1000 pontos por metro quadrado — com técnicas avançadas de processamento, permitindo modelar a morfologia detalhada de árvores individuais. Isso possibilita a estimativa de parâmetros estruturais, características fundamentais para a análise de florestas (LIANG *et al.*, 2016; WARFIELD e LEON, 2019). Os modelos tridimensionais podem ser gerados manualmente, com uso de softwares específicos, ou por meio de algoritmos automatizados.

A maior motivação para o uso da tecnologia TLS em inventários florestais foi a melhora na eficiência do trabalho em parcelas, substituindo a medição manual por medições automatizadas (MURPHY *et al.*, 2010) e isto tem se confirmado nos últimos anos visto que

avanços foram observados. Entre as vantagens adicionais estão a eficiência logística, a otimização do tempo em campo e sua natureza não invasiva, garantindo que a técnica não interfira na integridade do ecossistema estudado (ASCHOFF & SPIECHR, 2004).

Nas últimas duas décadas, o TLS transformou significativamente o campo das medições estruturais de árvores (CALDERS *et al.*, 2020) e vem sendo utilizado e disseminado em todo o mundo, os estudos de Cifuentes *et al.*, (2014) e Almeida (2015) são exemplos disto:

Cifuentes *et al.*, (2014) avaliaram o potencial da tecnologia TLS em estudos estruturais e o percentual de clareiras em três áreas de florestas na Bélgica. Os resultados recomendam o uso do TLS para estimar clareira em florestas jovens, mas não recomendam o uso em florestas intermediárias e maduras pelo alto custo envolvido e pouca melhoria em comparação com a medição manual. Eles concluem que embora o método propicie um grande detalhamento, o conjunto de dados pode ser subestimado devido aos fatores climatológicos, como vento e interferência de luz no ambiente.

Almeida (2015) utilizou o TLS para avaliar a suscetibilidade e impactos dos incêndios florestais em áreas de terras firme e de Igapó na Amazônia Central. De acordo com os resultados coletados, o LIDAR terrestre portátil demonstrou eficiência no levantamento dos danos causados pelos incêndios florestais, além disso os parâmetros estruturais da floresta coletados após os acidentes foram obtidos de forma rápida e eficaz.

Em manguezais, o TLS tem demonstrado grande potencial para superar desafios metodológicos associados a esses ecossistemas, como a alta densidade de vegetação e as condições ambientais adversas. Essa tecnologia permite capturar dados precisos sobre a estrutura das árvores e a dinâmica do ecossistema, proporcionando uma visão abrangente das interações entre fatores bióticos e abióticos. Por ser uma ferramenta de fácil mobilidade, possui alta capacidade de adquirir informações detalhadas da vegetação, principalmente abaixo do dossel.

Na última década o número de estudos em manguezais utilizando TLS vem aumentando gradualmente. Alguns dos primeiros estudos que integram o TLS e a análise estrutural de florestas de mangue foram produzidos neste período e uma das primeiras contribuições foi de Feliciano *et al.* (2014). Outros estudos também podem ser destacados:

Feliciano *et al.*, (2014), estudando manguezais no Parque Nacional Everglades, utilizaram o TLS para estimar a biomassa aérea e avaliar a estrutura de florestas de mangue. O estudo apresenta uma comparação entre os dados obtidos pelo TLS e métodos tradicionais, demonstrando a eficiência do TLS em fornecer estimativas precisas de altura, DAP e volume

de árvores. A pesquisa evidencia a capacidade do TLS em capturar detalhes de árvores bem desenvolvidas e calcular a biomassa de forma não destrutiva.

Olagoke *et al.*, (2016) ampliaram as equações alométricas para árvores de maior desenvolvimento em florestas de mangue, utilizando dados obtidos pelo TLS. Os autores destacam a importância de incluir árvores maiores nas estimativas de biomassa, já que elas frequentemente são subestimadas por métodos tradicionais. O estudo contribui para uma melhor compreensão da distribuição da biomassa em manguezais e do papel dessas florestas no ciclo global de carbono.

Warfield e Leon (2019) investigaram o uso combinado de TLS e a técnica de Structure-from-Motion (SFM) derivada de UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) para estimar o volume de árvores de mangue. O estudo visou aprimorar as metodologias de levantamento e monitoramento da estrutura florestal em manguezais, um ecossistema crítico para a captura de carbono e a proteção costeira.

Kargar *et al.*, (2021) abordam o uso de TLS de baixo custo para avaliar mudanças na elevação da superfície em florestas de mangue. A pesquisa teve como objetivo desenvolver uma metodologia eficaz e acessível para monitorar a elevação da superfície do solo em ecossistemas de manguezal, que são críticos para a mitigação das mudanças climáticas devido ao seu papel como sumidouros de carbono.

Niwa *et al.*, (2023) avaliaram a eficácia de diferentes plataformas de Lidar para medir a estrutura tridimensional de manguezais. O artigo concluiu que o TLS é a melhor opção para capturar detalhes estruturais em pequena escala, enquanto o Lidar aerotransportado é mais adequado para áreas maiores. A pesquisa ofereceu novas perspectivas sobre a escolha de plataformas para estudos em manguezais com diferentes objetivos.

Adimoolam *et al.*, (2025) utilizaram dados obtidos por TLS em um manguezal para realizar a estimativa da biomassa, comparando os resultados com métodos tradicionais de medição, como inventários de campo e modelos baseados em características dendrométricas. Os autores destacaram as vantagens do TLS, como sua alta precisão na medição da estrutura tridimensional das árvores, o que permite um cálculo mais preciso da biomassa em comparação com as técnicas convencionais.

Os estudos analisados refletem o avanço da aplicação do TLS em estudos de manguezais. Esses estudos indicam que o TLS segue como uma ferramenta versátil e que agrega valor para o estudo do ecossistema, combinando precisão técnica com um vasto campo de aplicações.

2.4 O TLS em diferentes tipos fisiográficos (franja, bacia e transição)

A aplicação de tecnologias de escaneamento como o TLS representa uma inovação para o estudo da estrutura tridimensional de florestas de mangue. O TLS, que possui um método de escaneamento de baixo para cima, permite capturar dados volumétricos e estruturais especificamente do tronco dos indivíduos com precisão, oferecendo informações que antes eram limitadas a representações bidimensionais (DISNEY, 2019).

Em florestas de alto desenvolvimento, o método não encontra grandes obstáculos, visto que são áreas onde as árvores se encontram espaçadas e isso proporciona uma nuvem de pontos mais limpa ou com menos oclusões. Nas florestas do tipo bacia, a combinação de solos encharcados e a presença de troncos múltiplos aumenta os desafios para a utilização do TLS. A estabilização do equipamento e dos alvos é essencial para garantir a qualidade das leituras, enquanto o fenômeno de oclusão é mais frequente do que nas florestas de franja, dificultando a coleta de dados. Apesar dessas adversidades, o TLS se destaca por sua alta resolução em ambientes densamente estruturados, possibilitando a modelagem precisa de troncos principais e secundários (CALDERS *et al.*, 2015). Com o objetivo de aprimorar os métodos de medição estrutural em florestas de desenvolvimento intermediário ou *multi stemmed*, a integração do TLS com técnicas tradicionais se apresenta como uma solução eficaz. Essa combinação permite superar os desafios impostos pela alta densidade de troncos e complexidade estrutural, garantindo maior precisão e eficiência na obtenção de informações estruturais.

Nas florestas de transição ou arbustivas, a utilização do TLS também é promissora para a coleta de dados estruturais. Contudo, sua aplicação enfrenta desafios significativos devido à alta densidade da vegetação, que provoca oclusão. Além disso, solos alagados ou altamente salinos podem refletir ou absorver o feixe de laser, prejudicando a qualidade dos dados coletados. Esses problemas requerem um planejamento estratégico dos pontos de varredura e o uso de ângulos variados para minimizar as áreas sombreadas e aumentar a cobertura (LIANG *et al.*, 2016). Adicionalmente, as parcelas permanentes em áreas de transição costumam ser maiores, o que demanda o uso do TLS em combinação com abordagens de amostragem estratégica, como o estabelecimento de parcelas representativas. Essa estratégia permite extrapolar os dados coletados em áreas menores para regiões mais amplas, utilizando modelos que integram medições precisas do TLS e dados de sensoriamento remoto em escala regional (WILKES *et al.*, 2017). Embora o TLS ofereça avanços

consideráveis no monitoramento de áreas complexas como as florestas de desenvolvimento arbustivo, sua integração com outras tecnologias, como o escaneamento a laser aéreo (ALS), pode ser necessária para capturar informações mais abrangentes e melhorar a cobertura nesses ecossistemas.

2.5 Oclusões

Apesar do avanço nos estudos de florestas de mangue através da tecnologia do TLS, percebe-se, na prática, que nos manguezais, ecossistemas de estrutura altamente singular, é imprescindível a adaptação do método de coleta para garantir que a representação da área seja precisa e que alguns desafios sejam superados. Um dos principais desafios nesse tipo de ambiente é a oclusão. A oclusão, no contexto do escaneamento a laser, ocorre quando determinados pontos de uma área não são capturados devido à obstrução dos feixes de laser por objetos no caminho, como vegetação ou outros obstáculos. Esse fenômeno resulta na ausência de dados em partes da nuvem de pontos gerada pelo scanner (TERRY, 2024)

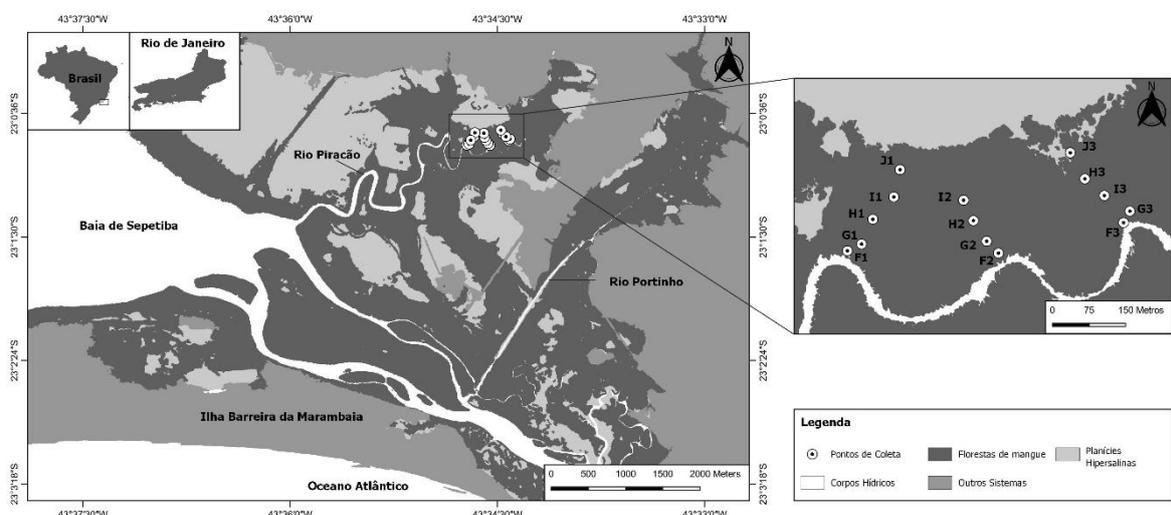
Assim, a escolha de um arranjo adequado de escaneamento a laser é essencial para garantir resultados precisos em cada aplicação. Em áreas com vegetação densa, como as florestas de estrutura arbustiva, é recomendado aumentar a densidade do padrão de escaneamento, o que pode ser feito aumentando o número de varreduras ou linhas de voo por unidade de área, caso seja utilizado mais de um método como a varredura aérea. Isso ajuda a reduzir a oclusão, ou seja, a obstrução dos feixes de laser. Embora existam tecnologias, como scanners com múltiplos retornos e abordagens com várias posições de escaneamento, que buscam minimizar a oclusão, ela ainda pode afetar a precisão das medições da estrutura das árvores.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se na região oeste do município do Rio de Janeiro, na porção leste da baía de Sepetiba, abrangendo as florestas de mangue de Guaratiba entre o rio Piraquê e a serra de Guaratiba. Esta área faz parte da Reserva Biológica Estadual de Guaratiba (RBG) (figura 2), protegendo um ecossistema com 18,81 km² de florestas de mangue e 9,34 km² de planícies hipersalinas (SOARES, 1997; ALMEIDA, 2014). A temperatura média anual é de 23,5°C e a precipitação anual média é de 1.067 mm, com alta variabilidade interanual da precipitação tendo maior pluviosidade em janeiro e março e períodos secos em junho e agosto (ESTEVAM, 2013; ESTRADA *et al.*, 2008). Segundo Estevam (2013), Guaratiba possui um padrão irregular de distribuição das chuvas, e pode passar por déficit hídrico por longos períodos de tempo (de poucos meses a mais de três anos). Possui um regime de micromarés com amplitude inferior a dois metros, o que faz com que suas áreas mais internas sejam atingidas apenas pelas marés de sizígia, ocasionando a formação de planícies hipersalinas. (PELLEGRINI, 2000).

Figura 2 – Área de estudo na Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, Rio de Janeiro - RJ. Em detalhes as parcelas permanentes monitoradas pelo NEMA e utilizadas no presente estudo.



Fonte: adaptado do shape criado por Almeida et al (2014). Parcelas indicadas pelas letras F e G estão localizadas na floresta de franja. Parcelas indicadas pelas letras H e I estão localizadas na floresta de bacia. Parcelas indicadas pela letra J estão localizadas nas florestas de transição.

Segundo Estrada *et al.*, (2013) e Soares *et al.*, (2017), as florestas de mangue de Guaratiba apresentam clara distinção entre os tipos fisiográficos: florestas de franja com maior desenvolvimento estrutural e florestas de transição para a planície hipersalina com o menor desenvolvimento. Ainda segundo os autores, essa variabilidade acontece em resposta ao gradiente de redução da frequência de inundação pelas marés e aumento da salinidade da água intersticial que acontece desde a margem (baía, rios e canais) até a transição com planícies hipersalinas, revelando uma redução de tamanho das árvores e um aumento da densidade ao longo do gradiente franja-bacia-transição. Este padrão pode ser associado à elevação topográfica da região, que possui uma tendência de elevação em direção à planície hipersalina.

As florestas de franja, localizadas ao longo do rio Piracão e em contato direto com a água do rio, são dominadas por *Rhizophora mangle* e atingem altura média de 7 m e DAP médio de 7 cm, com presença ocasional de *Avicennia schaueriana* (tabela 1) (SOARES *et al.*, 2017). As florestas de bacia, em ambientes mais abrigados e com substrato anóxico, apresentam um desenvolvimento estrutural intermediário, com menor DAP médio, altura média e área basal, que as florestas de franja e maior densidade de troncos, predominando *A. schaueriana* e ocorrendo *R. mangle* nos canais de drenagem. Já as florestas de transição, em contato com planícies hipersalinas, são colonizadas principalmente por *Laguncularia racemosa* e exibem menor desenvolvimento estrutural, com árvores de menor porte e alta densidade – tabela 1 (ESTRADA *et al.*, 2013).

O presente estudo foi realizado nas 3 transversais que são monitoradas pelo NEMA (Núcleo de Estudos em Manguezais). Cada transversal possui 5 parcelas permanentes que ficam localizadas desde a margem do rio Piracão até o limite da floresta com a planície hipersalina. As parcelas estão localizadas nos três tipos fisiográficos identificados (franja, bacia e transição) e representam os diferentes níveis de inundação pela maré (ESTRADA *et al.*, 2013). As parcelas permanentes (figura 2) já possuem uma caracterização estrutural feita com base na metodologia tradicional (tabela 1), utilizada pelo laboratório há 30 anos.

Tabela 1 – Parâmetros estruturais medidos a partir do método tradicional.

Tipo Fisiográfico	DAP médio (cm)	Altura média (m)	Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹)	Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	Espécie		
						Viva	Morta
Franja	11,6 a 14,9	8,5 a 12,9	1600 a 2051,3	23,1 a 38,1	<i>Avicennia schaueriana</i>	6,50 a 52,02	0 a 11,51
					<i>Laguncularia racemosa</i>	0 a 7,99	0 a 2,28
					<i>Rhizophora mangle</i>	43,25 a 92,90	0,45 a 7,85
Bacia	5,3 a 8,9	4,31 a 5,01	3250 a 5500	13,5 a 26,5	<i>Avicennia schaueriana</i>	15,19 a 78,84	0 a 13,48
					<i>Laguncularia racemosa</i>	0 a 6,26	0 a 19,41
					<i>Rhizophora mangle</i>	17,91 a 81,22	0 a 4,37
Transição	2,9 a 3,8	2,38 a 3,61	1211,1 a 2017,9	14,5 a 21,9	<i>Avicennia schaueriana</i>	16,52 a 48,16	13,38 a 24,72
					<i>Laguncularia racemosa</i>	7,58 a 24,57	4,55 a 8,93
					<i>Rhizophora mangle</i>	2,10 a 49,92	0,09 a 0,19

3.2 Método tradicional de caracterização fitossociológica

A coleta manual de dados para a caracterização fitossociológica foi baseada na metodologia descrita por Cintron & Schaeffer-Novelli (1984) e Schaeffer-Novelli & Cintron (1986), seguindo os seguintes passos:

Determinação das Parcelas

Para delimitação das parcelas, foi utilizada uma bússola, trena de 50m e nylon. Nestas parcelas, para caracterização, foram obtidos os seguintes atributos estruturais para cada árvore: diâmetro dos troncos à altura do peito (DAP, medido a 1,30 m do solo), altura da árvore, número de troncos por indivíduo, condição dos troncos (vivo ou morto) e sua espécie. Todas as árvores possuem seus indivíduos identificados por etiquetas numeradas e marcadas com tinta no local de medição de DAP.

As parcelas permanentes utilizadas neste estudo, foram delimitadas no ano de 2003 e desde então são monitoradas pelo NEMA/UERJ. Até o ano de 2014 eram feitas medidas anuais, a partir daí e até o presente momento, são realizadas a cada dois anos.

Diâmetro à Altura do Peito (DAP)

As estimativas de diâmetro sempre consideram a árvore como sendo uma circunferência. Por convenção, o diâmetro é medido a 1,3m do solo (altura do peito do observador, chamado de Diâmetro à Altura do Peito ou DAP). O valor é obtido através de uma fita graduada em unidades de π (3,1416 cm). Todas as árvores (vivas ou mortas) maiores que 1,0 m de altura presentes na parcela são medidas e o número de suas etiquetas são anotados.

Altura

A altura total é a distância vertical linear entre o solo e a base da folha mais alta da árvore. Esta variável fundamental é obtida, com o auxílio do hipsômetro, vara telescópica ou régua graduada, de todas as árvores maiores que 1,0 m. A altura média foi calculada utilizando os dados de todas as árvores vivas encontradas em cada parcela e servirá como um

dos parâmetros para caracterização do desenvolvimento da floresta. As árvores mortas não têm sua altura considerada.

Cálculos dos Parâmetros Estruturais das Florestas

DAP Médio: é uma medida de estrutura da vegetação que representa o diâmetro da árvore de área basal média. É calculado utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\text{DAP médio} = \frac{[(g) (12732,39) / n]^{1/2}}{n}$$

Onde, g= área basal por hectare; n = número de troncos por hectare.

Área basal: representa a contribuição de madeira em cada floresta, ou seja, é a área de troncos por área de terreno. Esta medida é um ótimo índice do grau de desenvolvimento estrutural.

A área basal é calculada pela fórmula:

$$g = 0,00007854 (\text{DAP})^2$$

Onde, g = área basal do tronco (em m²); DAP = diâmetro à altura do peito (em cm).

Área basal por hectare: Mede-se o diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores na parcela, calcula-se a área basal de cada árvore ($A = \pi \cdot \text{DAP}^2 / 4$) e soma-se para obter a área basal total da parcela. O valor é então extrapolado para um hectare, dividindo pelo tamanho da parcela e multiplicando o resultado por 10.000 m² (caso a parcela não tenha 1 ha). A unidade de medida utilizada é o metro quadrado por hectare (m².ha⁻¹)

Área basal por espécie: Após identificar as árvores por espécie, calcula-se a área basal de cada indivíduo. Soma-se a área basal de todas as árvores da mesma espécie e, em seguida, extrapola-se para hectare, da mesma forma que no cálculo geral.

Área basal por condição: As parcelas são agrupadas por categorias de condição ambiental (vivo/morto), fisiografia (franja, bacia, transição), estágio sucessional ou distúrbios. O cálculo da área basal é realizado apenas para as parcelas correspondentes a cada condição, garantindo uma análise separada por tipo ambiental.

Densidade: A densidade de troncos por espécie e condição (vivo/morto) é calculada em cada estação de medição. Em cada parcela de área previamente conhecida, contabiliza-se o número total de troncos. Com base na área de cada parcela, os resultados são convertidos para a escala de hectare, permitindo a comparação entre parcelas de diferentes tamanhos. A unidade de medida utilizada é o número de troncos por hectare (tr.ha^{-1}).

3.3 Descrição e configurações do instrumento utilizado

O aparelho utilizado para as varreduras foi o FARO Focus 3D S70 (Figura 3), um scanner a laser avançado de longo alcance, projetado para capturar nuvens de pontos tridimensionais de alta resolução. Ele utiliza um laser pulsado de modulação de amplitude (AM) para enviar feixes laser de alta intensidade e precisão. Após atingir o alvo, o laser retorna ao scanner e é detectado por um receptor integrado. O tempo decorrido entre o envio do pulso laser e a detecção do retorno é calculado para determinar a distância até o objeto, utilizando como princípio que a luz viaja em velocidade constante. Este scanner é capaz de capturar pontos com uma resolução espacial de até alguns milímetros, dependendo das configurações e do ambiente de digitalização. Além disso, é conhecido por sua alta precisão, capturando detalhes minuciosos e geometrias complexas com uma margem de erro reduzida, geralmente na faixa de milímetros. É um scanner rápido, capaz de capturar nuvens de pontos densas em um curto período de tempo, o que o torna ideal para aplicações que exigem eficiência e rapidez na aquisição de dados tridimensionais. (LIANG *et al.*, 2016). O aparelho realiza uma leitura de 360° em torno do seu eixo horizontal e 305° em torno do eixo vertical, com acurácia de 1 milímetro a 10 metros e alcance máximo de 70 metros.

Figura 3 – Imagem do laser Scanner. Aparelho FARO Focus 3D S70 utilizado no presente estudo



Foto: Silva, 2024

A configuração do aparelho de varredura requer ajustes específicos de acordo com as condições do local. Parâmetros como a resolução do scanner, a taxa de amostragem, a intensidade do laser e a velocidade de varredura precisam ser calibrados adequadamente. O alcance externo foi ajustado para uma distância superior a 20 metros, permitindo a captura de objetos situados além desse limite. A resolução, definida como 1/5, e a qualidade de varredura configurada como 2x, foram selecionadas de modo a equilibrar a duração da varredura (3 minutos e 42 segundos por cena), o tamanho dos dados coletados (Pt) e a distância pontual (mm/10m), garantindo a eficiência e precisão da coleta de dados de acordo com o objetivo do estudo. Sensores integrados, como inclinômetro, bússola, altímetro e GPS, foram ativados para registrar informações complementares. Além disso, a captura de imagens coloridas foi habilitada. Essas etapas garantem que o equipamento realize varreduras com alta confiabilidade e qualidade.

No presente estudo, foi utilizado um perfil de configuração previamente estabelecido por Silva (2022) para os manguezais de Guaratiba, denominado "mangue", que se encontra salvo nas configurações do modelo FARO Focus 3D 70S (Figura 3).

3.4 Método TLS e a coleta de dados

A realização de um planejamento adequado antes do trabalho de campo é essencial para otimizar tanto o tempo quanto a qualidade dos dados coletados. Um planejamento eficiente envolve a organização prévia de todos os materiais e equipamentos que serão utilizados, como o hardware e dispositivos para varredura, materiais de marcação de área, instrumentos de escrita, alvos, trenas e mochilas. A antecipação dessas necessidades é fundamental para garantir que o trabalho de campo ocorra de forma segura, ágil e sem interrupções. Além disso, o conhecimento prévio das características do local a ser escaneado é crucial para minimizar erros e aumentar a precisão dos dados coletados. Assim, aspectos como a dimensão da área a ser escaneada (m^2), níveis de maré, precipitação e rajadas de vento precisam ser previstos para assegurar que as condições climáticas e ambientais não comprometam o processo de coleta de dados e a qualidade dos mesmos.

Antes das varreduras as parcelas de estudo foram delimitadas com trenas e alvos visuais esféricos e planos, foram fixados de forma estratégica durante todo o processo para garantir visibilidade em varreduras adjacentes e servirem de referência para o processamento das nuvens de pontos geradas (figuras 4 e 5). Esse procedimento é fundamental para reduzir os impactos da oclusão sobre a qualidade dos dados coletados, maximizando a eficiência do processo e assegurando a obtenção de resultados confiáveis (ALBA *et al.*, 2008; HILKER *et al.*, 2010; WILKES *et al.*, 2017).

Figura 4– Alvos planos em material de ACM (*Aluminium Composite Material*).



Fonte Silva, 2024.

Figura 5 – Alvos esféricos de material retroreflexivo com fitas coloridas



Foto: Silva, 2024.

A adaptação dos alvos às características do sedimento é um aspecto crucial para garantir a estabilidade e a precisão das varreduras a laser. Dependendo das condições do terreno, foi necessário ajustar a base de fixação dos alvos utilizados. Em ambientes de manguezal, com ambiente lamoso, saturado de água ou rico em matéria orgânica, torna-se

fundamental assegurar que os alvos estejam firmemente posicionados para evitar deslocamentos que possam comprometer a qualidade dos dados coletados. Por conta dessas condições foram utilizados dispositivos de fixação adequados, como tripés ou hastes com pontas afiadas, que proporcionam maior estabilidade. Esses dispositivos fixam os alvos de maneira eficiente, mesmo em solos instáveis, garantindo que permaneçam no local designado ao longo do processo de escaneamento.

Antes de iniciar a coleta de dados com o TLS em qualquer zona, é imprescindível realizar uma análise criteriosa de variáveis ambientais e estruturais que podem influenciar o processo de amostragem e a qualidade dos dados obtidos. Entre os aspectos fundamentais a serem avaliados estão: a altura média e máxima dos indivíduos, a densidade dentro da parcela, as dimensões específicas da área de estudo (m²), a presença de canais ou corpos d'água, e a ocorrência de árvores próximas as margens. Tais informações são essenciais para definir o método mais adequado, otimizar a logística e assegurar a robustez e representatividade dos dados coletados.

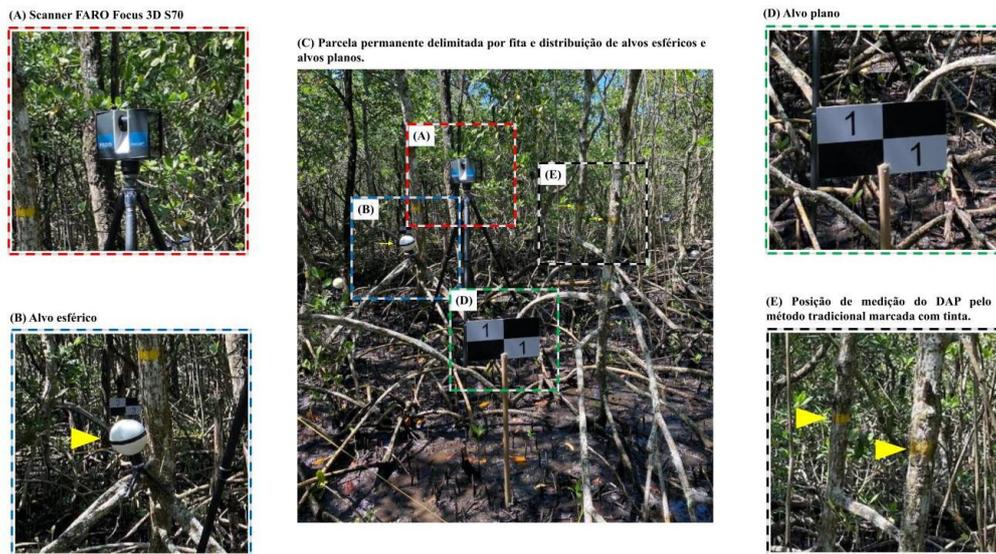
3.4.1 Florestas de franja

Por ser uma área menos densa, o escaneamento a laser encontra menos barreiras e consegue ter retornos satisfatórios (em relação a densidade de pontos) num raio maior, possibilitando uma menor quantidade de varreduras. Segundo estudos anteriores como José (2020) e Silva (2022), para essas áreas são feitas entre 6 e 8 leituras. Algumas parcelas de franja apresentam características específicas, como a presença de canais, indivíduos ribeirinhos e raízes mais desenvolvidas, que podem impactar no processo de escaneamento. Nessas áreas, o laser frequentemente reflete ou é absorvido em superfícies alagadas, resultando em falhas na aquisição de dados e lacunas na nuvem de pontos. Além disso, os rizóforos, conhecidos popularmente como raízes-escoras, contribuem significativamente para a oclusão, criando obstáculos na captura precisa de informações estruturais.

Para minimizar esses desafios, é crucial posicionar os alvos de forma estratégica (figura 6), considerando a topografia e os elementos específicos da parcela. Em situações onde as raízes-escora são proeminentes, pode ser necessário fixar os alvos diretamente sobre essas estruturas, garantindo uma melhor cobertura de pontos e reduzindo os impactos da

ocusão sobre a qualidade dos dados coletados. Esse planejamento detalhado é essencial para maximizar a eficiência do processo e assegurar a obtenção de resultados confiáveis.

Figura 6 – Posicionamento estratégico dos alvos esféricos e planos nas florestas de mangue estudadas em Guaratiba para minimizar as oclusões na área.



O tempo de duração de cada leitura do equipamento a laser foi em torno de 3 min e 42 s, foi possível obter a varredura de toda uma parcela em até 37 min e 62 s e de toda a transversal em 2 h e 9 min (tabela 2).

As quantidades de leituras utilizadas neste estudo, para a caracterização das florestas de franja, variaram de acordo com o tamanho de cada parcela, visto que a área de estudo apresenta parcelas permanentes de 195 até 315 m² (tabela 2).

Tabela 2 – Numero de escaneamentos e tempo total para coleta de dados por... nas parcelas em floresta de franja do manguezal de Guaratiba.

Estação	Tipo fisiográfico	Área (m ²)	Número de varreduras	Tempo
F1	Franja	240	7	00:23:94
G1	Franja	315	11	00:37:62
F2	Franja	225	6	00:20:52
G2	Franja	195	7	00:23:94
F3	Franja	225	10	00:34:02
G3	Franja	225	10	00:34:02
Total				02:09:01

3.4.2 Floresta de bacia

As zonas de bacia utilizadas neste estudo apresentam características distintas das florestas de franja, incluindo solos mais alagados e um desenvolvimento intermediário das árvores, conforme descrito por Estrada *et al.*, (2013) e Soares *et al.*, (2017). O alagamento do solo é consequência de sua topografia, que favorece a formação de bolsões de água devido à menor influência das marés e à consequente redução na lavagem das superfícies.

Nessas áreas, a densidade de indivíduos é geralmente maior que na franja, com uma ampla variação na altura das árvores, que podem medir de 2 a 13 metros. O diâmetro das árvores varia entre 2 e 18 centímetros, de acordo com os dados estruturais coletados para este estudo. Apesar da maior densidade em comparação com as florestas de franja, as parcelas permanentes de bacia estudadas neste trabalho são menores, com dimensões variando entre 80 e 90 m². Essa característica pode reduzir o número necessário de varreduras para coleta de dados estruturais por TLS, sendo utilizadas entre 6 e 8 varreduras por parcela, com a disposição de 12 alvos. O tempo de duração de cada leitura fica em torno de 3 min e 42 s, é possível obter a varredura de toda uma parcela em até 23 min e 94 s e de toda a transversal em 2 h, 10 min e 09 s. Sendo assim, com a devida atenção e execução do método, o processamento dos dados desta área não apresentará grandes dificuldades.

As quantidades de leituras utilizadas neste estudo, para caracterização das florestas de bacia, variam de acordo com o tamanho de cada parcela, visto que a área de estudo apresenta parcelas permanentes de até 90 m² (tabela 3).

Tabela 3 – Numero de escaneamentos e tempo total para coleta de dados de... na floresta de transição do manguezal de Guaratiba.

Estação	Tipo fisiográfico	Área (m²)	Número de scans	Tempo
H1	Bacia	80	6	00:20:52
I1	Bacia	80	6	00:20:52
H2	Bacia	80	6	00:20:52
I2	Bacia	80	6	00:20:52
H3	Bacia	90	7	00:23:94
I3	Bacia	80	6	00:20:52
Total				02:10:09

3.4.3 Florestas de transição

As florestas de mangue na transição para a planície hipersalina são caracterizadas por uma elevada densidade de indivíduos e um desenvolvimento estrutural reduzido (ESTRADA *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2017). Essas condições são resultado da menor influência das marés, que limita a renovação da água, levando ao aumento da salinidade no solo, um estressor significativo para as árvores. Nesses ambientes, o porte das árvores pode variar de menos de 1 metro a até 8 metros de altura de acordo com os dados estruturais coletados para este estudo. A alta densidade de vegetação dificulta não apenas o deslocamento, mas também a realização de varreduras a laser.

No contexto da TLS, a oclusão causada pela variação na altura e pela densidade e porte arbustivo dos indivíduos representa um desafio técnico significativo. Nesses cenários, o posicionamento adequado do scanner se torna crucial, pois a presença de plantas aglomeradas, folhagens densas e estruturas finas pode intensificar o efeito de sombreamento, causando diversos desafios, como a dificuldade na identificação de caules, na distinção entre caules vizinhos e na fusão de partes desconectadas do caule em nuvens de pontos (XIA *et al.*, 2015)

O método aplicado nas parcelas de transição foi baseado e adaptado de Wilkes, *et al.*, (2017) onde o padrão geral de escaneamento forma uma “cadeia” contínua em que cada local de leitura estava vinculado ao local anterior e ao seguinte. Com isso, algumas estratégias foram adotadas para maior qualidade da coleta de dados, como a utilização de objetos de fácil visualização para contornar as parcelas (figura 7) e a adoção de cores nos alvos esféricos (figura 8). A estratégia de inserir elementos coloridos aos alvos esféricos foi adotada pela dificuldade na sua identificação em áreas de transição, e foi tão exitosa que foi utilizada para os demais tipos fisiográficos. Esses ajustes no método foram feitos para que fosse mais fácil a identificação dos alvos nos softwares de tratamento dos dados e assim fosse possível criar uma nuvem de pontos com a menor quantidade de lacunas possível. Foram utilizadas de 4 a 6 fileiras (figura 9) dependendo do tamanho da parcela, os alvos são posicionados nas primeiras duas fileiras e são realizadas as leituras, ao fim do escaneamento da segunda, os alvos da primeira fileira são transferidos para a terceira e assim sucessivamente (figura 9). Esse processo metódico e cuidadoso foi essencial para garantir a captura de dados estruturais precisos em um ambiente tão desafiador quanto as florestas de transição.

O tempo de duração de cada leitura fica em torno de 3 min e 42 s e é possível obter a varredura de toda uma parcela em até 1 h e 30 min. Sendo assim, com a devida atenção e execução do método, o processamento dos dados desta área não apresenta grandes dificuldade. A quantidade de leituras utilizadas neste estudo varia de acordo com o tamanho de cada parcela, visto que a área de estudo apresenta parcelas permanentes de até 180 m² (tabela 4).

Tabela 4 – Número de escaneamentos e tempo total para coleta de dados na floresta de transição do manguezal de Guaratiba.

Estação	Tipo fisiográfico	Área (m ²)	Número de scans	Tempo
J1	Transição	180	18	00:61:56
J3	Transição	112	17	00:58:14
Total				01:30:09

Figura 7 – Estação de varredura a laser em floresta de transição em Guaratiba com a separação em fileiras fileiras com trena amarela.



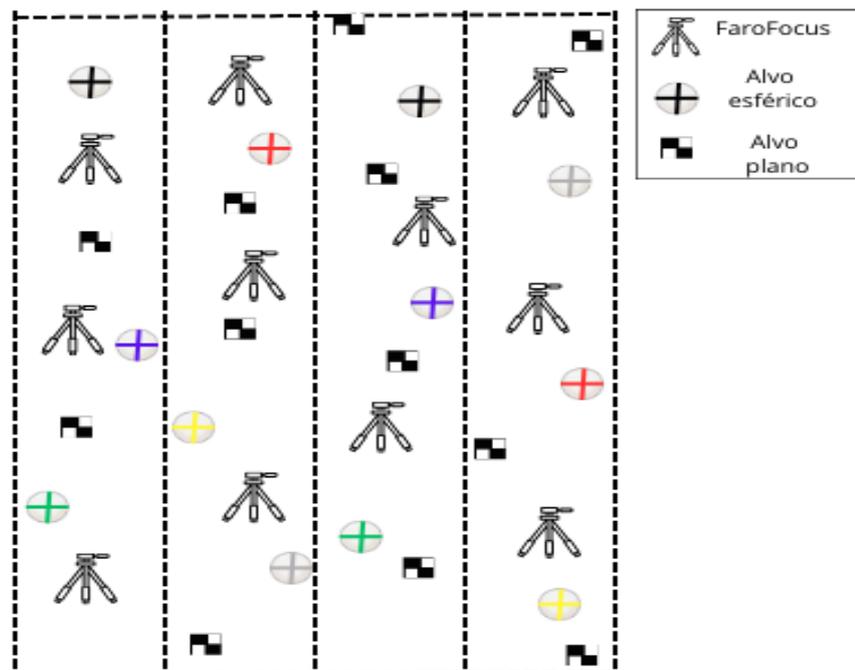
Fonte: Silva, 2024

Figura 8 – Alvos esféricos com fitas coloridas para facilitar sua visualização.



Fonte: Silva, 2024.

Figura 9 – Esquema da metodologia utilizada para escaneamento da floresta de transição baseada em Wilkes, *et al.*, (2017). Os alvos esféricos estão representados em diferentes cores no esquema; o tripé representa o posicionamento do scanner ao longo das faixas.



Após a coleta dos dados, foi criada uma tabela para organizar as informações da nuvem de pontos. Assim como no método tradicional, nessa tabela são realizados os cálculos de (DAP, altura, densidade e área basal, necessários para determinar os parâmetros estruturais da floresta.

3.5 Processamento dos dados

Para início do tratamento dos dados em laboratório, os dados brutos foram importados individualmente por leitura e carregados para um dos softwares utilizados (RECAP PRO® ou SCENE 3D POINT CLOUD®), criando uma nuvem de pontos de varredura. Alguns parâmetros foram considerados na escolha do software para tratamento das imagens. O RECAP PRO é recomendado para projetos que envolvem análises detalhadas de áreas escaneadas, com ferramentas que facilitam a coleta de parâmetros estruturais de florestas. Já o SCENE 3D POINT CLOUD possui maior capacidade de lidar com grandes volumes de dados e tem registro automatizado e preciso de nuvem de pontos, sendo crucial para montagens de grandes áreas como florestas de transição. A escolha entre os softwares dependeu das necessidades de cada estação escaneada, pois cada uma possui seus prós e contras, que serão destacados a seguir.

Recap Pro®

Prós:

Facilidade de uso: o RECAP possui uma interface bastante intuitiva, o que facilita bastante para usuários que nunca tiveram contato com esse tipo de software.

Visão 3D x visão real: são ferramentas que permitem a visualização da área escaneada em 3D ou como uma representação mais realista, como uma foto, o que facilita a análise detalhada de objetos e áreas.

Ferramentas especializadas: dentro do contexto florestal, o RECAP fornece a funcionalidade de ferramentas como o “pipe snap”, muito útil para a medição de DAP diretamente nas árvores escaneadas, e a ferramenta “régua métrica” que pode ser utilizada para medição da altura das árvores.

Precisão na edição: o software fornece também a possibilidade de separar as árvores individualmente utilizando a função de recorte, que melhora a precisão nas análises.

Contras:

Processamento limitado para nuvem de pontos muito densas: o software possui dificuldade para lidar com nuvens de ponto muito densas ou muito grandes.

Custo: embora seja gratuito para inscrições da comunidade educacional, o software é parte da família AUTODESK e cobra uma assinatura de alto valor para usuários fora deste grupo.

Scene 3D Point Cloud®

Prós:

Especializado: o SCENE foi desenvolvido para lidar com nuvens de pontos geradas por dispositivos de escaneamento a laser, como os da FARO.

Algoritmos avançados de registro: o software possui algoritmos eficazes para registros de cenas adjacentes, o que garante um co-registro preciso e rápido das varreduras, com ótima automação no reconhecimento dos alvos.

Capacidades avançadas: permite o ajuste fino dos parâmetros de registro durante e após o processamento, oferecendo maior controle sobre a qualidade dos dados.

Contras:

Interface: o SCENE possui uma interface mais técnica, e isso prejudica o aprendizado para usuários iniciantes por possuir grande número de opções e ajustes.

Uma vez que o SCENE possui uma interface mais técnica, se torna um software menos versátil do que o RECAP para projetos que exijam múltiplas perspectivas de visualização e manipulação, principalmente para a coleta de parâmetros estruturais.

Os softwares utilizam diferentes métodos para avaliar a qualidade do registro das cenas e geram relatórios que apresentam os valores de erros referentes ao registro,

diferenciando um mínimo e um máximo erro por meio de cores, baseados em parâmetros distintos.

O programa SCENE gera uma tabela (figura 10) baseada na média das distâncias (medida em milímetros) entre os pontos correspondentes dos diferentes conjuntos (scans) que foram alinhados ou registrados. Em geral, quando essa distância média de erro for inferior a 20 mm, o resultado é considerado dentro de um limite aceitável, indicando que a sobreposição (ou correspondência) entre os dados dos diferentes scans está boa. Por outro lado, se o valor ultrapassar 40 mm, isso sugere que há um erro mais elevado no registro dos dados – ou seja, os pontos de uma área correspondente entre scans estão, em média, muito distantes uns dos outros, o que pode comprometer a precisão do modelo 3D gerado, segundo os manuais de usuário do software SCENE Point Cloud da empresa FARO.

Figura 10 – Dados de referência gerados pelos softwares para montagem de nuvem de pontos. (A) métricas de erro do registro (ou “alinhamento”) dos dados de nuvem de pontos. No programa SCENE 3D POINT CLOUD (b) métricas de erro usadas para avaliar a qualidade do registro (ou sobreposição) das nuvens de pontos no programa RECAP PRO.



Fonte: Softwares Scene 3D Point Cloud e Recap Pro.

Já o programa RECAP aplica um esquema de cores (figura 10) em que os valores de erros inferiores a 6 mm indicam que a sobreposição dos pontos atingiu uma acurácia superior a 90%. Ou seja, se a discrepância (erro) média entre os pontos correspondentes (ou entre os pontos digitalizados e a superfície de referência) for menor que 6 mm, isso é interpretado como um registro muito preciso. Além disso, o RECAP calcula o RMS (Root Mean Square ou “raiz média quadrática”), que é uma medida estatística que reflete a diferença média entre a superfície real do solo e o ponto de pesquisa em cada digitalização (scan). Essa métrica, calculada após a aplicação de uma transformação estimada, serve para quantificar o “ruído”

ou a variação residual nos dados coletados. Conforme descrito no site da Autodesk (2024). Disponível em: www.autodesk.com.

Com base nas características acima descritas, o software SCENE foi escolhido para montar as cenas, especialmente, das parcelas de maior tamanho e densidade, devido à sua capacidade de realizar a montagem automaticamente. Já o RECAP PRO foi utilizado no processamento dos dados, no registro das cenas e na extração dos parâmetros estruturais, como pode ser observado na tabela 5.

Tabela 5: Softwares utilizados para criação e tratamento de dados nas florestas de franja, bacia e transição.

FRANJA	BACIA	TRANSIÇÃO
SCENE 3D POINT CLOUD® RECAP PRO®	RECAP PRO®	SCENE 3D POINT CLOUD® RECAP PRO®
O SCENE 3D POINT CLOUD® para a criação de nuvens de pontos mais densas. O RECAP PRO® para a criação das nuvens de pontos, registro das cenas e extração de parâmetros estruturais, como o DAP, altura, densidade e área basal.	O RECAP PRO®, para a geração das nuvens de pontos, registro das cenas e a extração dos parâmetros estruturais.	SCENE 3D POINT CLOUD® para criação das nuvens de pontos. RECAP PRO® para extração dos parâmetros estruturais.

3.6 Análise Estatística

Após processar os dados obtidos através do escaneamento a laser, os parâmetros estruturais gerados foram comparados com os parâmetros obtidos pelo levantamento fitossociológico tradicional, que foram considerados como valores de referência.

Para validação dos parâmetros fitossociológicos gerados pelo TLS foram utilizadas as seguintes métricas, conforme descritas por Hodson (2022), Olagoke *et al.*, (2016) e Tavares *et al.*, (2016): Mean Absolute Percentage Error (MAPE) ou do português Erro Percentual Absoluto Médio, Root Mean Squared Error (RMSE) ou Raiz Quadrada do Erro Quadrático

Médio, e a RMSE (%) Raiz quadrada do Erro Quadrático Médio Percentual usando as Equações 1, 2 e 3, respectivamente:

$$MAPE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right| \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Y_i = Valores obtidos pelo método tradicional (valores de referência)

\hat{Y}_i = Valores obtidos pelo método TLS

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (2)$$

Onde:

Y_i = Valores obtidos pelo método tradicional (valores de referência)

\hat{Y}_i = Valores obtidos pelo método TLS

n = Número total de observações

$$RMSE(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \times RMSE \quad (3)$$

Onde:

\bar{Y} = Média dos valores obtidos pelo método tradicional (valores de referência)

$RMSE$ = Root Mean Squared Error (Equação 2)

Adicionalmente foram realizadas análises de regressões lineares entre os parâmetros estruturais obtidos pelo método tradicional (variáveis independentes) com os parâmetros obtidos pelo método TLS (variáveis dependentes) com os dados obtidos para cada estação de amostragem. Análises de correlação (Pearson) entre os métodos também foram realizados. Para as regressões lineares e correlações os outliers não foram considerados.

4 RESULTADOS

4.1 Florestas de Franja

Os resultados obtidos pelo método tradicional variaram entre 11,6 cm e 14,9 cm para o DAP médio e entre 8,5 m e 12,9 m para a altura, enquanto o método TLS apresentou variações de 12,1 cm a 16,1 cm para o DAP médio e 9,2 m a 12,4 m para altura média (tabela 5 e figura 11). A densidade de troncos pelo método tradicional variou de 1.600 a 2.051 tr.vivos.ha⁻¹, enquanto pelo TLS oscilou entre 1.428 a 2.051 tr.vivos.ha⁻¹. A área basal variou entre 23,1 a 38,1 m².ha⁻¹ utilizando-se o método tradicional e entre 22,7 e 35,0 m².ha⁻¹ pelo método TLS (tabela 5 e figura 11).

A contribuição (%) em área basal viva ou morta por espécie apresentou boa correspondência entre os métodos, com destaques para os resultados de área basal viva nas estações F1 e G1 (tabela 5 e figura 11). Pelo método tradicional os dados mostram valores de 6,5 % para *Avicennia schaueriana* e 92,9 % para *Rhizophora mangle* na estação F1 enquanto na estação G1 os valores foram de 20,3 % para *A. schaueriana* e 74,2 % para *R. mangle*. Em comparação, utilizando-se o método TLS, a estação F1 apresentou valores de 7,7 % para *A. schaueriana* e 91,8 % para *R. mangle*, já a estação G1 apresentou valores de 18,6 % para *A. schaueriana* e 74,0 % para *R. mangle* de contribuição em área basal viva.

Figura 11 – Parâmetros estruturais da floresta de franja nas estações estudadas no manguezal de Guaratiba obtidos pelo método tradicional (barra cinza pontilhada) e pelo método TLS (barra branca pontilhada).

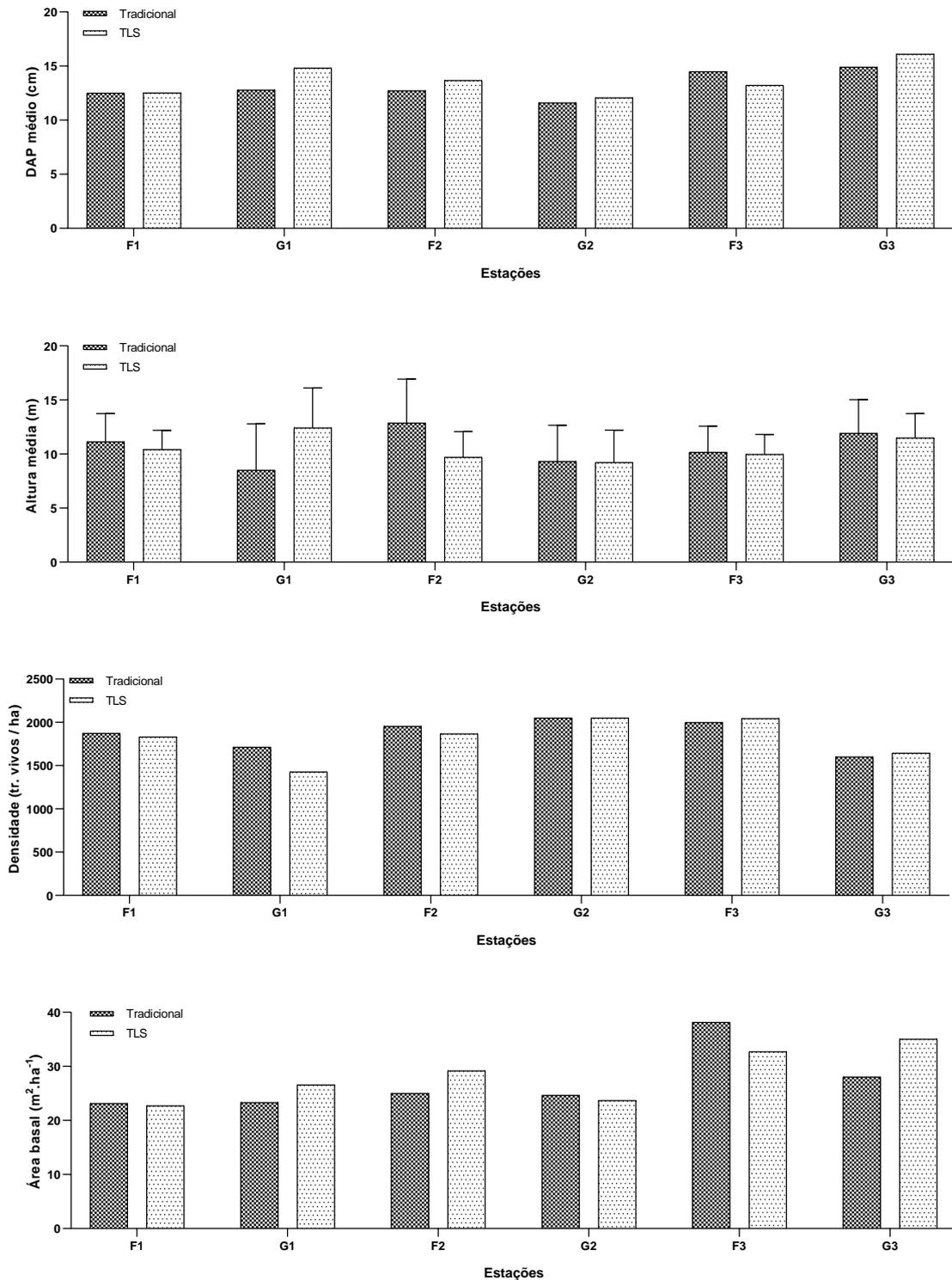


Tabela 6 – Parâmetros estruturais obtidos a partir dos dados coletados pelo método tradicional e método TLS nas estações estudadas nas florestas de franja no manguezal de Guaratiba (RJ).

Estação	DAP médio (cm)		Altura média (m)		Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹)		Área Basal (m ² .ha ⁻¹)		Espécie	Contribuição em área basal (%)			
	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS		viva		morta	
										Tradicional	TLS	Tradicional	TLS
F1	12,5	12,5	11,1	10,4	1875	1833	23,15	22,7	<i>Avicennia schaueriana</i>	6,50	7,70	0	0
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	0	0	0
									<i>Rhizophora mangle</i>	92,90	91,80	0,58	0,47
G1	12,8	14,8	8,5	12,4	1714	1428	23,33	26,6	<i>Avicennia schaueriana</i>	20,30	18,60	0,17	0,85
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	0	1,54	0
									<i>Rhizophora mangle</i>	74,20	74,04	3,75	6,47
F2	12,7	13,7	12,9	9,7	1955	1866	25,01	29,2	<i>Avicennia schaueriana</i>	52,02	40,06	0	4,40
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	0	0	0
									<i>Rhizophora mangle</i>	45,12	53,85	0,57	1,70
G2	11,6	12,1	9,3	9,2	2051	2051	24,64	23,7	<i>Avicennia schaueriana</i>	35,12	28,38	1,78	0,91
									<i>Laguncularia racemosa</i>	7,99	13,23	2,28	0
									<i>Rhizophora mangle</i>	43,25	57,49	7,85	0
F3	14,5	13,2	10,2	10,0	2000	2044	38,14	34,9	<i>Avicennia schaueriana</i>	40,21	31,47	11,51	12,30
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	0	0	0
									<i>Rhizophora mangle</i>	46,37	55,20	1,91	1,02
G3	14,9	16,1	11,9	11,5	1600	1644	28,05	35,0	<i>Avicennia schaueriana</i>	10,21	5,04	0	0
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	0	0	4,00
									<i>Rhizophora mangle</i>	89,35	90,66	0,45	0,29

Fonte: A autora, 2024.

Os resultados das análises dos erros utilizados para comparação dos métodos foram promissores para alguns parâmetros (Tabela 6). Os valores do MAPE foram de 7,39% para o DAP médio, 13,92% para altura média, 4,74% para densidade e 12,58% para área basal. Já utilizando o RMSE e RMSE %, os valores obtidos foram de 1,17cm (8.92%) para o DAP médio, 2,09 m (19,57%) para altura média, 125,98 tr.vivos.ha⁻¹ (6,75%) para densidade e 4,23 m².ha⁻¹ (15,2%) para área basal. Os testes de correlação entre os resultados obtidos através dos dois métodos apresentaram coeficientes (r) acima de 0,78, com destaque para altura média e densidade, que apresentaram valores acima de 0,95 (Tabela 6).

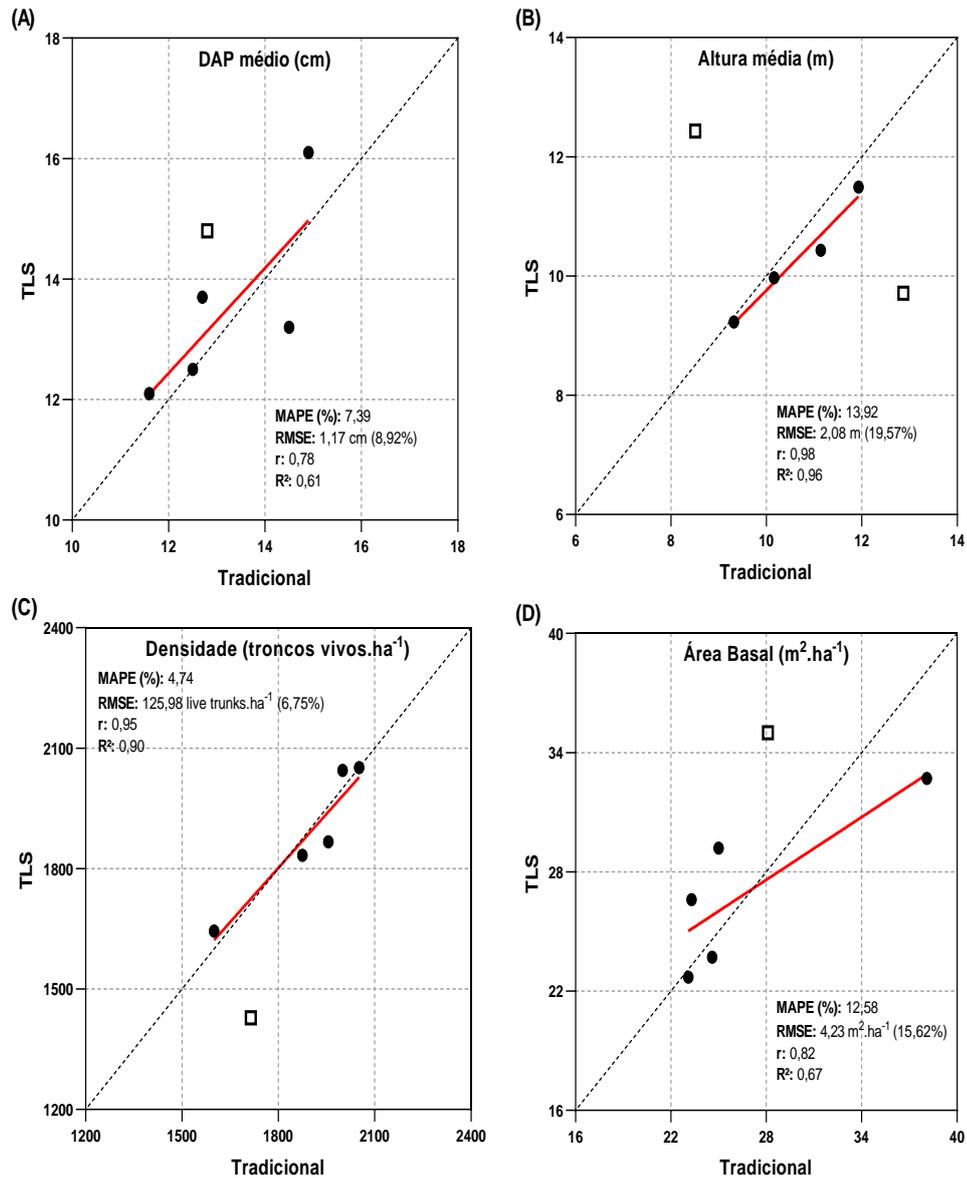
Tabela 7 – Comparação dos parâmetros estruturais determinados pelo TLS e método tradicional, para as florestas de franja de Guaratiba a partir das métricas erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r).

Parâmetros estruturais	MAPE (%)	RMSE	RMSE (%)	r	R²
DAP médio (cm)	7,39	1,17	8,92	0,78	0,61
Altura média (m)	13,92	2,09	19,57	0,98	0,96
Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹)	4,74	125,98	6,75	0,95	0,90
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	12,58	4,23	15,62	0,82	0,67

Fonte: A autora, 2024.

As regressões lineares (Figura 12) foram significativas para os parâmetros altura média e densidade, com valores de R² acima de 0,90 e não significativa para os parâmetros DAP médio e área basal, com valores de R² inferiores a 0,70, mesmo com a exclusão de outliers.

Figura 12 – Comparação do método TLS em relação às estimativas dos valores de referência (método tradicional) para os parâmetros estruturais: (a) DAP médio (cm), (b) Altura média (m), (c) Densidade (troncos vivos.ha⁻¹) e (d) Área basal (m².ha⁻¹), para as florestas de franja. A linha tracejada representa a relação 1:1, e a linha sólida vermelha indica o ajuste linear não considerando os outliers (indicados por quadrados).



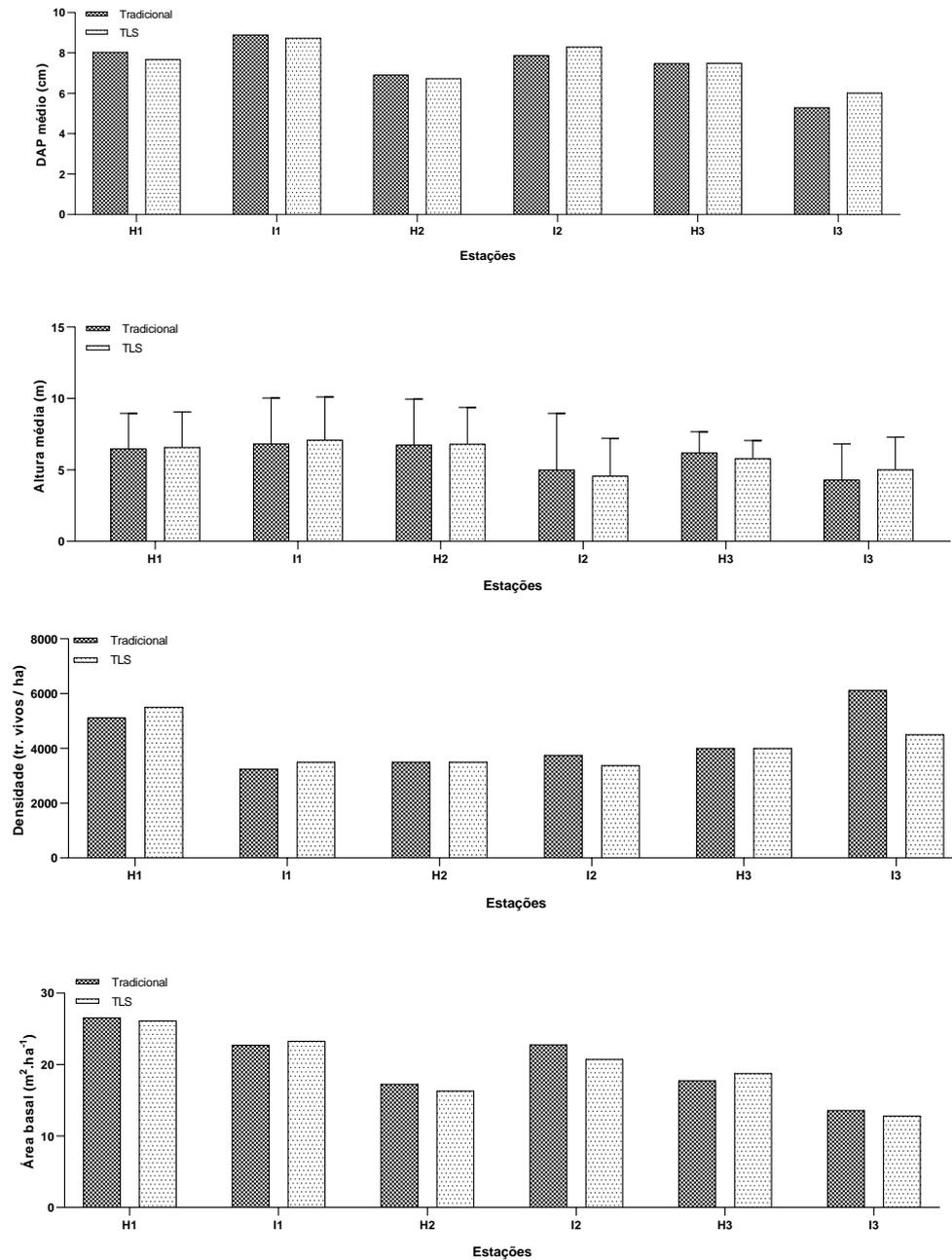
Fonte: A autora, 2024.

4.2 Florestas de Bacia

Os resultados obtidos pelo método tradicional variaram de 5,3 cm a 8,9 cm para o DAP médio e de 4,31 m a 6,84 m para a altura média. Já o método TLS apresentou variações de 6,0 cm a 8,7 cm para o DAP médio e de 4,58 m a 7,09 m para a altura média (tabela 7 e figura 13). A densidade de troncos registrada pelo método tradicional oscilou entre 3250 e 6125 troncos vivos.ha⁻¹, enquanto pelo método TLS os valores variaram de 3375 a 5500 troncos vivos.ha⁻¹. A área basal, por sua vez, apresentou valores de 13,5 a 26,5 m².ha⁻¹ pelo método tradicional e de 12,8 a 26,1 m².ha⁻¹ pelo método TLS (tabela 7 e figura 13).

A contribuição percentual (%) em área basal viva ou morta por espécie mostrou boa concordância entre os métodos, com destaque para os resultados de área basal viva nas estações H2 e I3 (tabela 7 e figura 13). No método tradicional, os dados indicaram 40,30% para *Avicennia schaueriana* e 29,49% para *Rhizophora mangle* na estação H2, enquanto na estação I3 os valores foram de 15,19% para *A. schaueriana* e 81,22% para *R. mangle*. Em comparação, os resultados obtidos pelo método TLS mostraram 37,86% para *A. schaueriana* e 32,58% para *R. mangle* na estação H2, e 16,11% para *A. schaueriana* e 83,39% para *R. mangle* na estação I3, em termos de contribuição em área basal viva.

Figura 13 – Parâmetros estruturais das estações das florestas de bacia do manguezal de Guaratiba obtidas pelo método tradicional (cinza pontilhada) e pelo método TLS (branca pontilhada): DAP médio (cm); altura média (m); densidade (tr.vivos.ha.⁻¹) e área basal (m².ha⁻¹).



Fonte: A autora, 2024.

Tabela 8 – Parâmetros estruturais obtidos a partir de dados coletados pelo método tradicional e pelo método TLS nas florestas de bacia do manguezal de Guaratiba.

Estação	DAP médio (cm)		Altura média (m)		Densidade (tronco.ha ⁻¹)		Área Basal (m ² .ha ⁻¹)		Contribuição por Área Basal (%)				
	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS		Espécies	Viva		Morta
									Tradicional		TLS	Tradicional	TLS
H1	8,0	7,7	6,48	6,59	5125	5500	26,5	26,1	<i>Avicennia schaueriana</i>	78,84	70,50	0,38	0
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	1,14	0	2,23
									<i>Rhizophora mangle</i>	19,03	25,77	1,75	0,37
I1	8,9	8,7	6,84	7,09	3250	3500	22,7	23,2	<i>Avicennia schaueriana</i>	71,10	74,18	3,12	4,08
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	0	7,63	5,93
									<i>Rhizophora mangle</i>	17,91	15,74	0,25	0
H2	6,9	6,7	6,74	6,81	3500	3500	17,2	16,3	<i>Avicennia schaueriana</i>	40,30	37,86	13,48	15,69
									<i>Laguncularia racemosa</i>	6,26	6,04	6,09	3,12
									<i>Rhizophora mangle</i>	29,49	32,58	4,37	4,72
I2	7,9	8,3	5,01	4,58	3750	3375	22,7	20,7	<i>Avicennia schaueriana</i>	61,05	66,57	0	0
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0,17	0	19,41	10,35
									<i>Rhizophora mangle</i>	18,92	21,26	0,45	1,82
H3	7,5	7,5	6,19	5,79	4000	4000	17,7	18,7	<i>Avicennia schaueriana</i>	31,60	30,18	0,71	0
									<i>Laguncularia racemosa</i>	0	5,42	0	6,01
									<i>Rhizophora mangle</i>	67,33	58,38	0,36	0,00
I3	5,3	6,0	4,31	5,02	6125	4500	13,5	12,8	<i>Avicennia schaueriana</i>	15,19	16,11	0	0
									<i>Laguncularia racemosa</i>	2,42	0	0,65	0
									<i>Rhizophora mangle</i>	81,22	83,39	0	0

Fonte: A autora, 2024.

Os resultados das análises dos erros utilizados para comparação dos métodos foram promissores para alguns parâmetros (Tabela 8). Os valores do MAPE foram de 4,67 % para o DAP médio, 6,33 % para altura média, 8,58 % para densidade e 4,97 % para área basal. Já utilizando o RMSE e RMSE %, os valores obtidos foram de 0,38cm (5,18%) para o DAP médio, 0,39 m (6,66%) para altura média, 705,26 tr.vivos.ha⁻¹ (16,43%) para densidade e 1,08 m².ha⁻¹ (5,41%) para área basal. Os testes de correlação entre os resultados obtidos através dos dois métodos apresentaram coeficientes (r) acima de 0,75, com destaque para DAP médio e área basal, que apresentaram valores acima de 0,95 (Tabela 8).

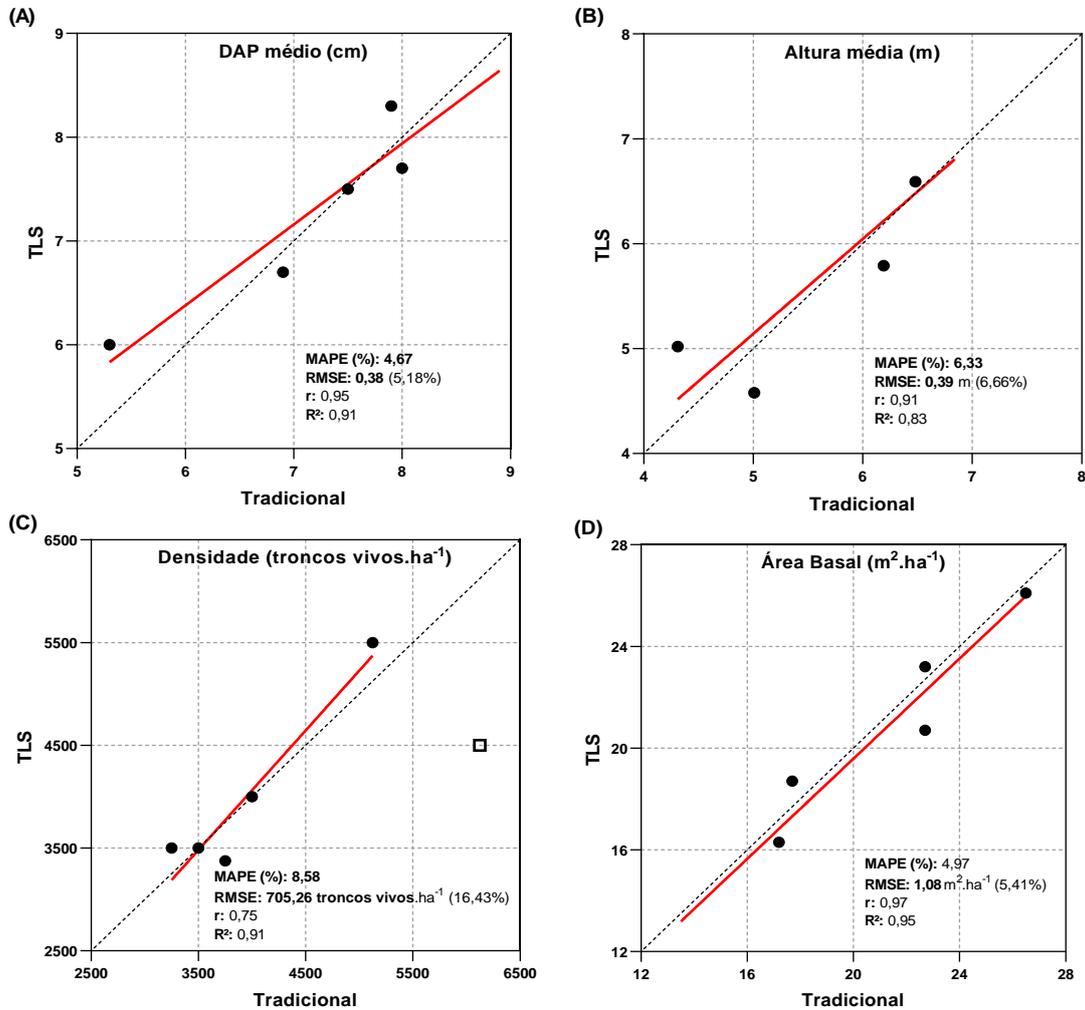
Tabela 9 – Comparação dos parâmetros estruturais pelo TLS e método tradicional a partir das métricas o erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R²), para as florestas de bacia no manguezal de Guaratiba.

Parâmetros estruturais	MAPE (%)	RMSE	RMSE (%)	r	R²
DAP médio (cm)	4,67	0,38	5,18	0,95	0,91
Altura média (m)	6,33	0,39	6,66	0,91	0,83
Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹)	8,58	705,26	16,43	0,75	0,91
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	4,97	1,08	5,41	0,97	0,95

Fonte: A autora, 2024.

As regressões lineares (Figura 14) foram significativas para todos os parâmetros DAP médio, densidade e Área Basal com valores de R² acima de 0,90 e não significativa para o parâmetro altura média, com valor de R² 0,83.

Figura 14 – Comparação do método TLS em relação às estimativas dos valores de referência (método tradicional) para os parâmetros estruturais nas florestas de bacia de Guaratiba: (a) DAP médio (cm), (b) Altura média (m), (c) Densidade (troncos vivos.ha⁻¹) e (d) Área basal (m².ha⁻¹). A linha tracejada representa a relação 1:1, e a linha sólida vermelha indica o ajuste linear não considerando os outliers (indicados por quadrados).



Fonte: A autora, 2024.

4.3 Florestas de Transição

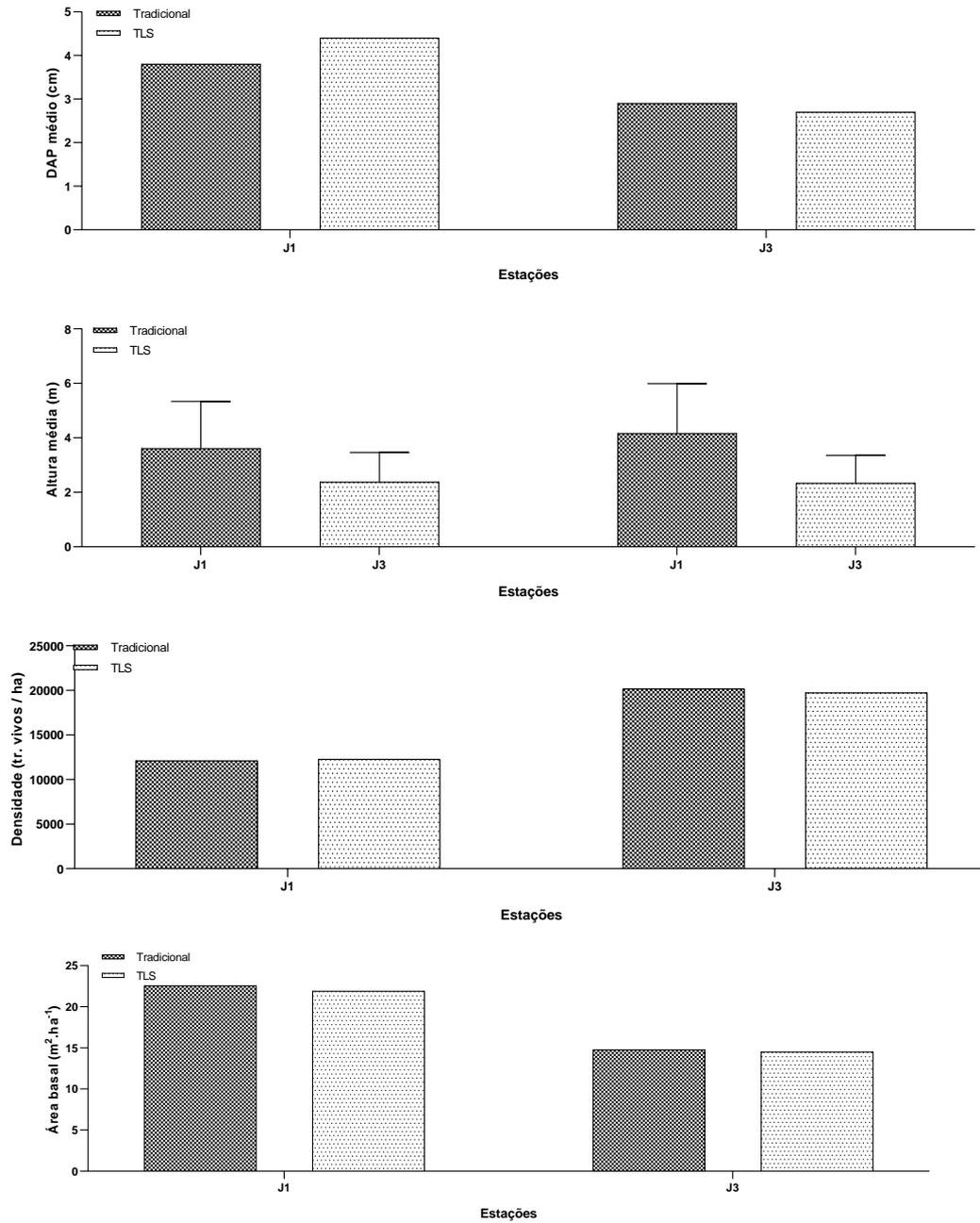
Apenas as estações J1 e J3 foram finalizadas neste estudo. A estação J2 foi a primeira estação de transição escaneada e o método descrito foi desenvolvido para minimizar as dificuldades encontradas, porém, não houve tempo de refazer esta etapa. O processamento da

estação J2 foi iniciado, mas ao longo do processo foi constatado que a nuvem de pontos não continha a densidade suficiente para expressar as características da área, além de demandar um tempo maior do que tínhamos disponível para driblar todas os obstáculos como: indivíduos sem copa, impossibilitando a medição de altura; indivíduos com a nuvem de pontos do tronco muito falhada, o que impossibilita a medição de DAP e identificação da espécie; ou até indivíduos que eram identificados no modo de imagem real mas não continha nuvem de pontos 3D.

Os resultados obtidos pelo método tradicional apresentaram valores de 2,9 cm e 3,8 cm para o DAP médio e 2,38 m e 3,61m para a altura média, enquanto o método TLS apresentou valores de 2,7 e 4,4 cm para o DAP médio e 2,34 a 4,16 m para altura média (tabela 9 e figura 16). A densidade de troncos pelo método tradicional apresentou valores de 1211,1 e 2017,9 tr.vivos.ha⁻¹, enquanto pelo TLS ficou em 1227,8 e 1973,2 tr.vivos.ha⁻¹. A área basal demonstrou 21,90 e 14,51 m².ha⁻¹ utilizando-se o método tradicional e 22,57 e 14,77 m².ha⁻¹ pelo método TLS (tabela 9 e figura 16).

A contribuição (%) em área basal viva ou morta por espécie apresentou diferença significativa se comparados os métodos. Pelo método tradicional os dados mostram valores de 34,58 % para *Avicennia schaueriana* e 20,72 % para *Rhizophora mangle* na estação J1 enquanto na estação J3 os valores foram de 16,52 % para *A. schaueriana* e 49,92 % para *R. mangle*. Em comparação, a estação J1 apresentou valores de 53,11 % para *A. schaueriana* e 17,53 % para *R. mangle*, já a estação J3 apresentou valores de 19,24 % para *A. schaueriana* e 37,78 % para *R. mangle* de contribuição em área basal viva com o método TLS.

Figura 15 – Parâmetros estruturais das estações das florestas de transição do manguezal de Guaratiba obtidas pelo método tradicional (cinza pontilhada) e pelo método TLS (branca pontilhada): DAP médio (cm); altura média (m); densidade (tr.vivos.ha.⁻¹) e área basal (m².ha⁻¹).



Fonte: A autora, 2024.

Tabela 10 – Parâmetros estruturais obtidos a partir de dados coletados pelo método tradicional e pelo método TLS nas florestas de transição do manguezal de Guaratiba.

Estação	DAP médio (cm)		Altura média (m)		Densidade (tronco.ha ⁻¹)		Área Basal (m ² .ha ⁻¹)		Contribuição por Área Basal (%)				
	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS	Tradicional	TLS	Espécies	Viva		Morta	
										Tradicional	TLS	Tradicional	TLS
J1	3,8	4,4	3,61	4,16	1211,1	1227,9	21,90	22,57	<i>Avicennia schaueriana</i>	34,58	53,11	28,45	13,49
									<i>Laguncularia racemosa</i>	7,58	11,22	8,54	4,55
									<i>Rhizophora mangle</i>	20,72	17,53	0,13	0,09
J3	2,9	2,7	2,38	2,34	2017,8	1973,2	14,51	14,77	<i>Avicennia schaueriana</i>	16,52	19,24	0,20	13,38
									<i>Laguncularia racemosa</i>	24,57	20,41	7,68	8,93
									<i>Rhizophora mangle</i>	49,92	37,78	1,12	0,19

Fonte: A autora, 2024.

Os resultados das análises dos erros utilizados para comparação dos métodos foram promissores para alguns parâmetros (Tabela 10). Os valores do MAPE foram de 10,43% para o DAP médio, 8,52% para altura média, 1,79% para densidade e 2,41% para área basal. Já utilizando o RMSE e RMSE %, os valores obtidos foram de 0,42cm (12,6%) para o DAP médio, 0,38 m (12,9%) para altura média, 336,95 tr.vivos.ha⁻¹ (2,08%) para densidade e 0,50 m².ha⁻¹ (2,77%) para área basal. O teste de correlação entre os resultados não foi feito pela falta de n amostral.

Tabela 11 – Comparação dos parâmetros estruturais pelo TLS e método tradicional a partir das métricas o erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%).

Parâmetros estruturais	MAPE (%)	RMSE	RMSE (%)
DAP médio (cm)	10,43	0,42	12,6
Altura média (m)	8,2	0,38	12,9
Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹)	1,79	336,95	2,08
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	2,41	0,50	2,77

4.4 Florestas de mangue

Ao agruparmos todos os dados obtidos para as florestas de mangue de Guaratiba, observamos que os resultados das análises dos erros utilizados para comparação dos métodos foram promissores para alguns parâmetros (Tabela 11). Os valores do MAPE foram de 6,75% para o DAP médio, 9,89% para altura média, 5,96% para densidade e 7,87% para área basal. Já utilizando o RMSE e RMSE %, os valores obtidos foram de 0,82cm (8,87%) para o DAP médio, 1,39 m (18,5%) para altura média, 486,00 tr.vivos.ha⁻¹ (9,82%) para densidade e 2,86 m².ha⁻¹ (12,5%) para área basal. Os testes de correlação entre os resultados obtidos através dos dois métodos apresentaram coeficientes (r) acima de 0,89, com destaque para DAP médio e densidade, que apresentaram valores acima de 0,95 (Tabela 11).

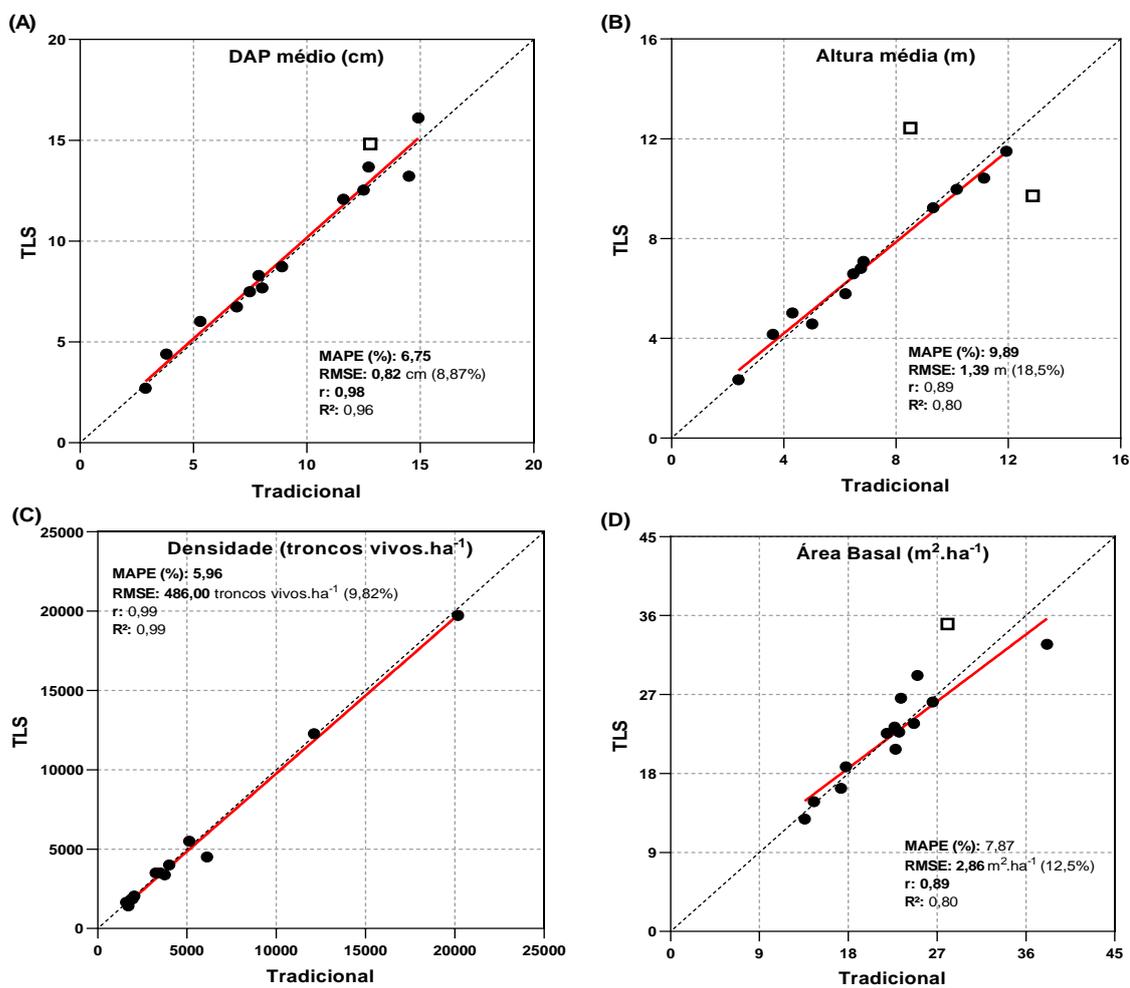
Tabela 12 – Comparação dos parâmetros estruturais pelo TLS e método tradicional, para as florestas de mangue de Guaratiba, a partir das métricas o erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R²).

Parâmetros estruturais	MAPE (%)	RMSE	RMSE (%)	r	R²
DAP médio (cm)	6,75	0,82	8,87	0,98	0,96
Altura média (m)	9,89	1,39	18,5	0,89	0,80
Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹)	5,96	486,00	9,82	0,99	0,99
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	7,87	2,86	12,5	0,89	0,80

Fonte: A autora, 2024.

As regressões lineares (Figura 16) foram significativas para todos os parâmetros, com valores de R² acima de 0,80 com destaque para DAP médio (R² = 0,96) e densidade (R² = 0,99).

Figura 16 – Comparação do método TLS em relação às estimativas dos valores de referência (método tradicional) para os parâmetros estruturais das florestas de mangue de Guaratiba: (a) DAP médio (cm), (b) altura média (m), (c) densidade (troncos vivos.ha⁻¹) e (d) área basal (m².ha⁻¹). A linha tracejada representa a relação 1:1, e a linha sólida vermelha indica o ajuste linear não considerando os outliers (indicados por quadrados).



Fonte: A autora, 2024.

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelo método TLS foram capazes de descrever de forma satisfatória o desenvolvimento estrutural das florestas de franja, bacia e transição do manguezal de Guaratiba, tendo-se como referência os parâmetros estruturais obtidos pelo método tradicional. Da mesma forma, o levantamento fitossociológico utilizando o método TLS possibilitou uma caracterização da composição das florestas de mangue estudadas, as quais são dominadas pelas espécies *Avicennia schaueriana* e *Rhizophora mangle*, com menor ocorrência de *Laguncularia racemosa*, estando tanto de acordo com os dados obtidos no presente estudo pelo método tradicional, como com os resultados apresentados por Estrada *et al.*, (2013) e Soares *et al.*, (2017) para essas mesmas florestas.

A comparação entre os dois métodos revela uma boa similaridade nos valores de DAP médio, com pequena tendência à obtenção de valores levemente superiores aos valores de referência ao se aplicar o método do TLS, com exceção da estação H2 na floresta de bacia (tabela 4) e a estação J3 na floresta de transição (tabela 6), que apresentaram valores relativamente menores. Estudos indicam que o uso de varreduras múltiplas com o TLS, proporcionam uma cobertura multiangular e elevadas taxas de detecção do fuste, fornecendo resultados mais precisos para o DAP (BIENERT *et al.*, 2006; THIES & SPIECKER, 2004). A adoção dessa abordagem com múltiplas varreduras explica a boa correlação entre os valores de DAP médio obtidos pelo método TLS e aqueles obtidos pelo método tradicional na maioria das estações estudadas. A viabilidade de aplicação do TLS para a caracterização do DAP médio fica mais evidente se considerarmos que a correlação obtida poderia ser ainda mais forte. Apesar de terem sido usadas as mesmas parcelas para comparar os métodos, houve uma diferença temporal entre a coleta de dados pelo método tradicional, realizado pelo programa de monitoramento de longo prazo das florestas de Guaratiba, e o TLS. Essa defasagem pode ter influenciado os resultados, pois eventos como tempestades podem ocasionar a queda de árvores. Além disso, em remedições de parcelas permanentes, é comum ocorrerem falhas, como a omissão na medição de alguns indivíduos, o que também pode impactar os dados obtidos. Embora as diferenças observadas sejam pequenas e não afetem o padrão de monitoramento da dinâmica das florestas, elas podem reduzir o coeficiente de correlação entre os dois métodos utilizados. Fatores como a interferência

do vento e a altura do tripé utilizada para obter as leituras do DAP pelo TLS (1,50 m, em média), em comparação com a altura padrão de medição do DAP (1,30 m), podem ter influenciado a precisão dos valores obtidos. Bienert *et al.* (2006) apontam que ajustes na distância e a divergência do feixe de laser podem justificar variações na qualidade dos dados. Cushman *et al.* (2014) também ressaltam que a altura padrão de 1,30 m nem sempre é ideal para árvores de florestas tropicais devido às deformidades nos troncos, recomendando medições em alturas maiores quando necessário. Cintrón e Schaeffer-Novelli (1984) sugerem procedimentos parecidos para lidar com situações como bifurcações ou ramificações altas, raízes-escora emergindo próximas ou acima de 1,30 m do solo, e troncos com deformações ou irregularidades. Com base nisto, medições realizadas em momentos diferentes pelos métodos tradicional e TLS podem ter levado a decisões ligeiramente distintas sobre o ponto exato de medição, contribuindo para desvios entre os resultados obtidos pelos dois métodos.

Além das medições em campo, outras etapas do processo podem afetar a correlação entre os parâmetros estruturais obtidos através de dados gerados pelo TLS e os valores de referência obtidos através do método tradicional. Segundo Calders (2015), uma das maiores dificuldades na obtenção do DAP através do TLS está no ajuste do círculo para determinação da circunferência nas imagens geradas. Essa dificuldade fica mais evidente em florestas arbustivas onde são encontrados DAP menores que 1 cm.

Portanto, apesar de todos esses fatores que podem provocar diferenças entre os valores de DAP médio obtidos pelo método TLS e o valor de referência (método tradicional), considera-se que os erros obtidos nas florestas de franja (MAPE = 7,3%; RMSE = 1,17 cm; RMSE% = 8,92%) e a boa correlação ($r = 0,78$); nas florestas de bacia (MAPE = 4,67%; RMSE = 0,38 cm; RMSE% = 5,18%) e muito boa correlação ($r = 0,95$); nas florestas de transição (MAPE = 10,43%; RMSE = 0,42 cm; RMSE% = 12,6%) apontam para o alto potencial do TLS para a caracterização do DAP médio dessas florestas de mangue (tabela 12).

As florestas de franja e bacia apresentam valores $< 10\%$ de MAPE e RMSE% o que demonstra que o método TLS possui uma excelente precisão em comparação com o tradicional, a pequena elevação desses valores na floresta de transição ainda demonstra boa precisão mas se coloca no limite do aceitável, o que aponta para a necessidade de aprimoramento do método para esses tipos de floresta.

Ainda são raros na literatura os estudos que comparam os parâmetros estruturais de florestas de mangue obtidos por levantamentos fitossociológicos tradicionais com

aqueles gerados a partir de dados coletados por TLS. No presente estudo a determinação do DAP médio através do TLS se mostrou muito satisfatória em comparação com os estudos de Calders (2015) e Moreno *et al.*, (2024), por exemplo. Isso porque os estudos citados foram feitos em florestas de *Eucalyptus* spp. e plantações de coníferas, ou seja, florestas com alto desenvolvimento estrutural e estruturas mais homogêneas que florestas de mangue, isso significa que os valores de RMSE encontrados por eles (1,34 cm por Moreno *et al.*, (2024) e 2,39 cm por Calders (2015)) são aceitáveis, assim como para o presente estudo onde a floresta de franja apresentou um RMSE de 1.17 cm, a floresta de bacia 0,38 cm e a floresta de transição 0,42 cm, as duas últimas demonstrando alta concordância entre os métodos.

Tabela 13 Comparação dos parâmetros estruturais determinados pelo TLS e método tradicional a partir das métricas erro percentual absoluto médio (MAPE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE (%), o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R²), para as florestas de franja, bacia e transição no manguezal de Guaratiba.

Parâmetros estruturais	Tipo fisiográfico	MAPE (%)	RMSE	RMSE (%)	r	R²
DAP médio (cm)	Franja	7,39	1,17	8,92	0,78	0,61
	Bacia	4,67	0,38	5,18	0,95	0,91
	Transição	10,43	0,42	12,6		
Altura média (m)	Franja	13,92	2,09	19,57	0,98	0,96
	Bacia	6,33	0,39	6,66	0,91	0,83
	Transição	8,2	0,38	12,9		
Densidade (troncos vivos.ha ⁻¹)	Franja	4,74	125,98	6,75	0,95	0,90
	Bacia	8,58	705,26	16,43	0,75	0,91
	Transição	1,79	336,95	2,08		
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	Franja	12,58	4,23	15,62	0,82	0,67
	Bacia	4,97	1,08	5,41	0,97	0,95
	Transição	2,41	0,50	2,77		

Fonte: A autora, 2024.

É nítido que os valores de RMSE para os parâmetros DAP médio, altura média e área basal apresentaram maior precisão nas florestas de bacia e transição se comparados com a floresta de franja (tabela 12). Essa discrepância pode ter relação com o ajuste entre as cenas escaneadas nesta área. É difícil obter um bom ajuste de cenas quando a área possui a presença de indivíduos ribeirinhos ou a passagem de canais com inundação frequente. Além disso, as estações deste tipo fisiográfico possuem a maior

área e são estruturalmente mais desenvolvidas, o que pode comprometer o vínculo necessário entre juma varredura e outra.

Sobre os valores de altura média obtidos pelo TLS, é possível dizer que mostraram um bom ajuste em relação ao método tradicional. No entanto, foi observada uma tendência de subestimação e superestimação da altura em algumas das parcelas analisadas para todos os tipos fisiográficos, um fenômeno previamente documentado por outros estudos (LINGNAU *et al.*, 2009; HOPKINSON *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2011; LIANG & HYYPPA, 2013; OLOFSSON *et al.*, 2014). Terry *et al.*, (2024) discutem as variações na precisão das medições com TLS, explicando que essa precisão está diretamente relacionada à qualidade da nuvem de pontos coletada, que é influenciada por diversos fatores durante o escaneamento e o processamento dos dados. Os autores destacam que florestas tropicais representam um ambiente desafiador para o TLS, sendo a oclusão um dos principais problemas nesse tipo de levantamento. Métodos tradicionais, como o uso de telémetros ópticos ou hipsômetros, dependem da visualização direta do ponto a ser medido, enquanto o TLS supera essa limitação, sendo frequentemente considerado mais preciso em condições adversas. Além disso, a interferência do vento pode complicar as medições da altura das árvores. Mesmo ventos de baixa intensidade podem causar um efeito fantasma na nuvem de pontos, resultante do movimento não apenas das copas, mas também dos troncos abaixo delas. Por essa razão, recomenda-se que os escaneamentos sejam realizados em condições de vento fraco (SEIDEL *et al.*, 2012; WILKES *et al.*, 2017).

No método tradicional, a medição da altura em florestas bem desenvolvidas enfrenta dificuldades significativas, incluindo a suscetibilidade a erros humanos e a baixa precisão dos equipamentos. Esses fatores comprometem a confiabilidade dos dados, especialmente em florestas densas, onde a visibilidade e o acesso às copas são limitados.

Sendo assim, não podemos ignorar, que os valores de altura obtidos pelo método tradicional e utilizados como referência, também estão sujeitos a interferências e erros.

Portanto, apesar dessas potenciais interferências e dificuldades na obtenção dos dados de altura, que podem ter induzido a obtenção de valores relativamente mais elevados de MAPE (13,92%) e de RMSE% (19,57%) na floresta de franja no presente estudo, a altura média obtida pelo TLS apresentou resultados satisfatórios, com coeficientes de correlação (r) elevados e significativos ($p <$) na comparação com o método tradicional na franja (0,98) e na bacia (0,91).

Este estudo também demonstrou a viabilidade da utilização dos dados obtidos pelo TLS para estimar outros parâmetros estruturais importantes na caracterização de florestas de mangue, como a densidade de troncos e a área basal. Os erros identificados na estimativa da densidade de troncos (tabela X) podem ser atribuídos, em grande parte, às variações na arquitetura e estrutura das espécies e, até mesmo, entre indivíduos, além das diferenças na execução dos métodos tradicional e TLS (KUNZ, 2017). Enquanto os troncos principais, que concentram a maior parte do volume de madeira, são medidos com alta precisão, troncos secundários e ramificações representam a principal fonte de erro, frequentemente resultando em diâmetros subestimados ou superestimados, especialmente em troncos mais finos, conforme apontado por Hackenberg *et al.* (2015) e Hess *et al.* (2015). Essas são exatamente as dificuldades encontradas no processamento de dados das florestas de bacia e principalmente de transição, onde é possível encontrar diâmetros de DAP de 1,18 cm até 0,4 cm. Ainda é preciso considerar as expedições para coletas de dados em dias diferentes. O método de referência faz o recrutamento de indivíduos, enquanto isso não é possível com o TLS, portanto, se as atividades de campo para coleta de parâmetros forem feitas em datas diferentes, a densidade e área basal podem apresentar discrepâncias.

Embora este estudo não tenha apresentado uma correlação perfeita para todos os parâmetros avaliados entre os métodos tradicional e TLS, os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios no contexto de análise em nível de floresta. Destacam-se, particularmente, os coeficientes de determinação (R^2) para os parâmetros DAP médio e altura média, que alcançaram valores de 0,96 e 0,80, respectivamente. Em comparação, o estudo recente conduzido por Adimoolam *et al.* (2025), no qual foram escaneadas, em média, 80 árvores em florestas de mangue em Thane Creek, Mumbai, com o objetivo de desenvolver um processo de estimativa de biomassa, os coeficientes obtidos foram significativamente inferiores, com valores de R^2 de 0,28 e 0,53 para os mesmos parâmetros.

Os avanços recentes na tecnologia de escaneamento a laser têm proporcionado levantamentos de campo com alta precisão e detalhamento, o que abre novas possibilidades para a integração com dados obtidos por sensoriamento remoto. Essa abordagem pode otimizar os parâmetros de aquisição de dados e ampliar significativamente o alcance de estudos voltados à análise da vegetação (LEVICK *et al.*, 2021).

CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram a viabilidade e o potencial do uso do método TLS na obtenção de parâmetros estruturais de florestas de mangue, em comparação ao método tradicional. A semelhança entre os valores de DAP médio, altura média, densidade e área basal obtidos pelos dois métodos indica que o TLS pode ser uma alternativa confiável e eficiente, especialmente em áreas de difícil acesso e alta complexidade, como as florestas de mangue. Este estudo mostrou que mesmo com levantamentos realizados em diferentes datas, o método TLS conseguiu caracterizar a floresta de forma satisfatória.

As variações e imprecisões na obtenção dos dados utilizados na estimativa dos parâmetros estruturais por TLS podem estar relacionadas às características específicas de cada floresta de mangue estudada, às condições ambientais no momento da aquisição dos dados e às possíveis falhas humanas no momento da coleta. Embora alguns desses fatores sejam incontroláveis, como as condições ambientais e as características intrínsecas das florestas, estratégias podem ser adotadas para mitigar seus impactos, como a realização de varreduras múltiplas e o planejamento da coleta de dados em períodos de condições mais favoráveis.

Com tudo que foi demonstrado é possível dizer que o uso do TLS, aliado a técnicas avançadas de processamento de dados, oferece uma solução para superar as limitações das metodologias tradicionais de inventário em florestas de mangue, possibilitando a obtenção de informações tridimensionais detalhadas, incluindo a arquitetura de árvores individuais.

Uma vantagem adicional do TLS é a capacidade de armazenar essas informações tridimensionais a longo prazo, permitindo estudos futuros e análises com tecnologias e técnicas que venham a ser desenvolvidas.

Assim, os resultados obtidos no presente estudo apontam para o TLS como uma ferramenta promissora e eficaz para a avaliação estrutural de florestas de mangue, fornecendo resultados precisos e contribuindo para a redução de erros associados aos métodos tradicionais de medição. Embora este estudo represente um avanço significativo, considerando que análises estruturais de florestas de mangue utilizando TLS ainda são raras na literatura, evidencia-se que há muito a ser explorado nesse campo. O aprimoramento do uso do TLS pode não apenas tornar os levantamentos

fitossociológicos mais rápidos e precisos, mas também abrir novas possibilidades para a compreensão e modelagem dessas florestas.

REFERÊNCIAS

ALBA, Mario et al. Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, p. 1053-1060, 2008.

ALMEIDA, Paula Maria Moura de. Na rede do mapeamento: uma análise da resposta espectral das florestas de mangue e do mapa como actante no espaço científico. 2015. 478 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ALMEIDA, P. M. et al. Mapping physiographic types of mangrove forests through the object-based classification method. *South-Eastern European Journal*, v. 3, p. 425–428, 1 May 2014.

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. Part 8, p. W2, 2004.

BALL, M. C. (1988). Ecophysiology of mangroves. In *Trees* (Vol. 2, pp. 129–142). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/BF00196018>

BIENERT, A. et al. Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 5, p. 1-5, 2006.

BRANDALIZE, M. C. B.; PHILIPS, J. W. Padrões de Classificação de Equipamentos Laser Utilizados em Levantamentos Terrestres e Aéreos. *Geodésia Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, Florianópolis*, v. 1, p. 1, 2002.

CALDERS, K. (2015). Terrestrial laser scanning for forest monitoring. <https://doi.org/10.18174/327787>

CALDERS, K., Adams, J., Armston, J., Bartholomeus, H., Bauwens, S., Bentley, L. P., Chave, J., Danson, F. M., Demol, M., Disney, M., Gaulton, R., Krishna Moorthy, S. M., Levick, S. R., Saarinen, N., Schaaf, C., Stovall, A., Terry, L., Wilkes, P., & Verbeeck, H. (2020). Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. In *Remote Sensing of Environment* (Vol. 251). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>

CALDERS, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., Culvenor, D., Avitabile, V., Disney, M., Armston, J., & Kaasalainen, M. (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2). <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12301>

CIFUENTES, R., van der Zande, D., Farifteh, J., Salas, C., & Coppin, P. (2014). Effects of voxel size and sampling setup on the estimation of forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 194, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.04.013>

CINTRÓN, G.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *Introducción a la Ecología del manglar*. Montevideo, Uruguay: UNESCO/OREALC, 1983.

CINTRÓN, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., & Morris, G. (1978). Mangroves of Arid Environments in Puerto Rico and Adjacent Islands. *Biotropica*, 10, 110. <https://doi.org/10.2307/2388013>

CINTRÓN, G., & Schaeffer-Novelli, Y. (1984). Methods for studying mangrove structure. In *The Mangrove Ecosystem: Research Methods*.

CUSHMAN, K. C., Muller-Landau, H. C., Condit, R. S., & Hubbell, S. P. (2014). Improving estimates of biomass change in buttressed trees using tree taper models. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 573–582. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12187>

DISNEY, M. (2019). Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees. In *New Phytologist* (Vol. 222, pp. 1736–1741). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.15517>

DUKE, N. C., Meynecke, J.-O., Dittmann, S., Ellison, A. M., Anger, K., Berger, U., Cannicci, S., Diele, K., Ewel, K. C., Field, C. D., Koedam, N., Lee, S. Y., Marchand, C., Nordhaus, I., & Dahdouh-Guebas, F. (2007). A World Without Mangroves? *Science*, 317, 41–42. <https://doi.org/10.1126/science.317.5834.41b>

ESTEVAM, M. R. M. Dinâmica de colonização de uma planície hipersalina por espécies de mangue em Guaratiba, RJ. Dissertação de mestrado—Programa de Pós-Graduação em Oceanografia: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2013.

ESTRADA, G. C. D. Análise espaço-temporal do sequestro e estoque de carbono na biomassa aérea de manguezais. Tese de doutorado—Programa de Pós-Graduação em Ecologia: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ESTRADA, G. C. D. et al. Analysis of the structural variability of mangrove forests through the physiographic types approach. *Aquatic Botany*, v. 111, p. 135–143, 1 Nov. 2013.

ESTRADA, G. C. D., Callado, C. H., Soares, M. L. G., & Lisi, C. S. (2008). Annual growth rings in the mangrove *Laguncularia racemosa* (Combretaceae). *Trees - Structure and Function*, 22, 663–670. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0224-9>

FELICIANO, E. A., Wdowinski, S., & 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). <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0558-6>

HACKENBERG, J., Morhart, C., Sheppard, J., Spiecker, H., & Disney, M. (2014). Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description. *Forests*, 5, 1069–1105. <https://doi.org/10.3390/f5051069>

HERNÁNDEZ-MORENO, J. A., Pérez-Salicrup, D. R., & Velázquez-Martínez, A. (2025). Measuring forest inventory parameters in planted forests using LiDAR technology: Comparison of methods. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16, 72–99. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1488>

HESS, C., Bienert, A., Härdtle, W., & von Oheimb, G. (2015). Does tree architectural complexity influence the accuracy of wood volume estimates of single young trees by terrestrial laser scanning? *Forests*, 6, 3847–3867. <https://doi.org/10.3390/f6113847>

HENTZ, AMK. **Obtenção de informações dendrométricas para inventário florestal automatizado por meio de veículo aéreo não tripulado (VANT). 2018, 238f.** 2021. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal do Paraná, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/60697>. Acesso em: 01 nov.

HILKER, T., van Leeuwen, M., Coops, N. C., Wulder, M. A., Newnham, G. J., Jupp, D. L. B., & Culvenor, D. S. (2010). Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand. *Trees - Structure and Function*, 24, 819–832. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0452-7>

HODSON, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. In *Geoscientific Model Development* (Vol. 15, Issue 14). <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

HOPKINSON, C., Sitar, M., Chasmer, L., & Treitz, P. (2004). Mapping snowpack depth beneath forest canopies using airborne lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 323–330. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.323>

KAUFFMAN, J. Boone et al. **Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests.** Bogor, Indonesia: Cifor, 2012.

KRAUSS, K. W., Lovelock, C. E., McKee, K. L., López-Hoffman, L., Ewe, S. M. L., & Sousa, W. P. (2008). Environmental drivers in mangrove establishment and early development: A review. In *Aquatic Botany* (Vol. 89, pp. 105–127). <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.014>

KUMAR Adimoolam, Y., Pillai, N. D., Lakshmanan, G., Mishra, D., & Kumar Dadhwal, V. (2025). Estimation of above ground biomass of mangrove forest plot using terrestrial laser scanner. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 28, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.11.002>

KUNZ, M., Hess, C., Raumonon, P., Bienert, A., Hackenberg, J., Maas, H. G., Härdtle, W., Fichtner, A., & von Oheimb, G. (2017). Comparison of wood volume estimates of young trees from terrestrial laser scan data. *IForest*, 10, 451–458. <https://doi.org/10.3832/ifor2151-010>

LEVICK, S. R., Whiteside, T., Loewensteiner, D. A., Rudge, M., & Bartolo, R. (2021). Leveraging tIs as a calibration and validation tool for mIs and uIs mapping of savanna structure and biomass at landscape-scales. *Remote Sensing*, 13, 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs13020257>

LIANG, X., & Hyypä, J. (2013). Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors (Switzerland)*, 13, 1614–1634. <https://doi.org/10.3390/s130201614>

LIANG, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., & Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>

LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* theme issue “Terrestrial Laser Scanning”. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 63. p. 1-3, 2008 (Editorial).

LINGNAU, Christel et al. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre Individual tree height mensuration with laser terrestrial data. **Ambiência**, v. 4, n. 4, p. 85-96, 2008.

LUGO, A. E., & Snedaker, S. C. (1974). The Ecology of Mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5(1).

MORENO, J.A.H., P´EREZ-SALICRUP, D.R., VELAZQUEZ-MARTÍNEZ, A., 2024. Medición de parámetros de inventario forestal en bosques plantados, mediante tecnología LiDAR: comparación de métodos. *Rev. Mex. De. Cienc. For.* 16, 72–99. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1488>.

MUKHERJEE, N., Sutherland, W. J., Dicks, L., Hugé, J., Koedam, N., & Dahdouh-Guebas, F. (2014). Ecosystem service valuations of mangrove ecosystems to inform decision making and future valuation exercises. *PLoS ONE*, 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107706>

MURPHY, G. E., Acuna, M. A., & Dumbrell, I. (2010). Tree value and log product yield determination in radiata pine (*pinus radiata*) plantations in australia: Comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 2223–2233. <https://doi.org/10.1139/X10-171>

NIWA, H., Ise, H., & Kamada, M. (2023). Suitable LiDAR Platform for Measuring the 3D Structure of Mangrove Forests. In *Remote Sensing* (Vol. 15). MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs15041033>

NOVELLI, Yara Schaeffer. **Manguezal ecossistema entre a terra e o mar**. São Paulo: Caribbean Ecological Research. Acesso em: 08 fev. 2025. , 1995

OLAGOKE, A., Proisy, C., Féret, J. B., Blanchard, E., Fromard, F., Mehlig, U., de Menezes, M. M., dos Santos, V. F., & Berger, U. (2016). Extended biomass allometric

equations for large mangrove trees from terrestrial LiDAR data. *Trees - Structure and Function*, 30(3). <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1334-9>

OLOFSSON, K., Holmgren, J., & Olsson, H. (2014). Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm. *Remote Sensing*, 6, 4323–4344. <https://doi.org/10.3390/rs6054323>

PELLEGRINI, J. A. de C. (2000). Caracterização da planície hipersalina (Apicum) associada a um bosque de mangue em Guaratiba, Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro - RJ. <https://doi.org/10.11606/D.21.2000.tde-26112008-134014>

PHAM, T. D., Yokoya, N., Bui, D. T., Yoshino, K., & Friess, D. A. (2019). Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/rs11030230>

ROUZBEH KARGAR, A., MacKenzie, R. A., Fafard, A., Krauss, K. W., & van Aardt, J. (2021). Surface elevation change evaluation in mangrove forests using a low-cost, rapid-scan terrestrial laser scanner. *Limnology and Oceanography: Methods*, 19, 8–20. <https://doi.org/10.1002/lom3.10401>

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CINTRÓN, G. Guia para estudo de áreas de manguezal; estrutura, função e flora. 1986.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., Cintrón-Molero, G., Soares, M. L. G., & De-Rosa, T. (2000). Brazilian mangroves. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 3, 561–570. <https://doi.org/10.1080/14634980008650693>

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., Cintrón-Molero, G., Adaime, R. R., & de Camargo, T. M. (1990). Variability of mangrove ecosystems along the Brazilian coast. *Estuaries*, 13(2). <https://doi.org/10.2307/1351590>

SILVA, M. N.; BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; MIRANDA, B.P. Varredura com laser terrestre para determinação das variáveis dendrométricas da

Araucaria angustifolia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 5509- 5516.

SEIDEL, D., Fleck, S., & Leuschner, C. (2012). Analyzing forest canopies with ground-based laser scanning: A comparison with hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154–155, 1. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.006>

SOARES, M. L. . Estudo da biomassa aérea de manguezais do sudeste do Brasil – Análise de modelos. Tese de Doutorado—Intituto de Oceanografia: Universidade de São Paulo, 1997.

SOARES, M. L. G., Chaves, F. D. O., Estrada, G. C. D., & Fernandez, V. (2017). Mangrove forests associated with salt flats: A case study from southeast Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 65, 102–115. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592017083006502>

SOARES, M. L. G., Estrada, G. C. D., Fernandez, V., & Tognella, M. M. P. (2012). Southern limit of the Western South Atlantic mangroves: Assessment of the potential effects of global warming from a biogeographical perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 101, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.02.018>

SPALDING, Mark D.; LEAL, Maricé. *The State of the World's Mangroves 2024*. 2024.

TANSEY, K., Selmes, N., Anstee, A., Tate, N. J., & Denniss, A. (2009). Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19). <https://doi.org/10.1080/01431160902882587>

TAVARES, Gisele Goulart 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*, v. 2, n. 10, p. 138-155, 2016.

TERRY, Louise. **Laser Scanning for Monitoring Tree Structure in Tropical Rainforests**. 2024. Tese de Doutorado. Ghent University.

TERRY, Louise et al. Multi-temporal 3D virtual forest reconstruction using terrestrial laser scanning in a temperate forest. In: **ForestSAT**. 2024.

THIES, Michael; SPIECKER, H. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. **Forest**, v. 2, n. 2.2, p. 1, 2004.

THOM, B. (1984). Coastal landforms and geomorphic processes. Monographs on Oceanographic Methodology No. 8 The Mangrove Ecosystem: Research Methods.

TWILLEY, R. R. (1995). Properties of mangrove ecosystems related to the energy signature of coastal environments. *Maximum Power: The Ideas and Applications of H. T. Odum*, January 1995.

TWILLEY, R. R., Chen, R. H., & Hargis, T. (1992). Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 64, 265–288. <https://doi.org/10.1007/BF00477106>

TWILLEY, R. R., Rivera-Monroy, V. H., Chen, R., & Botero, L. (1999). Adapting an ecological mangrove model to simulate trajectories in restoration ecology. *Marine Pollution Bulletin*, 37, 404–419. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00137-X)

WALSH, G. E. (1974). **MANGROVES: A REVIEW** Publication No. 154 from the Gulf Breeze Laboratory, Environmental Protection Agency, Gulf Breeze, Florida 32561 Associate Laboratory of the National Environmental Research Center, Corvallis. In *Ecology of Halophytes* (pp. 51–174). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-586450-3.50008-1>

WARFIELD, A. D., & Leon, J. X. (2019). Estimating mangrove forest volume using terrestrial laser scanning and UAV-derived structure-from-motion. *Drones*, 3, 1–17. <https://doi.org/10.3390/drones3020032>

WILKES, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., Gonzalez de Tanago, J., Bartholomeus, H., Brede, B., & Herold, M. (2017). Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.030>

V. J. CHAPMAN. *Mangrove Vegetation*. J. Cramer, Vaduz, 1976. Pp. 195 + 447, 22·5 × 14 cm with 298 figures including three fold-outs and 40 photographs. Price, DM 150. D. J. MABBERLEY.

YU, Xiaowei et al. Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. **Proceedings of the Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment—Instruments, Processing Methods and Applications**, p. 02-06, 2004.

XIA, S., Chen, D., Peethambaran, J., Wang, P., & Xu, S. (2021). Point cloud inversion: A novel approach for the localization of trees in forests from tls data. *Remote Sensing*, 13, 1–10. <https://doi.org/10.3390/rs13030338>

XIA, S., Wang, C., Pan, F., Xi, X., Zeng, H., & Liu, H. (2015). Detecting stems in dense and homogeneous forest using single-scan TLS. *Forests*, 6, 3923–3945. <https://doi.org/10.3390/f6113923>

ZHAO, Y., Im, J., zhen, Z., & Zhao, Y. (2023). Towards accurate individual tree parameters estimation in dense forest: optimized coarse-to-fine algorithms for registering UAV and terrestrial LiDAR data. *GIScience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2197281>

APÊNDICE

APÊNDICE A – Artigo relacionado a dissertação publicado em 22 de fevereiro de 2025.

Forest Ecology and Management 583 (2025) 122567



Contents lists available at ScienceDirect

Forest Ecology and Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/foreco





Evaluating terrestrial laser scanning for structural characterization of mangrove forests in Southeastern Brazil

Tatiane C. Matta ^{a,b,*}, Lucas Silva Pereira ^{a,b}, Yasmin C.B. Belmonte ^a,
Filipe de Oliveira Chaves ^{a,**}, Mário Luiz Gomes Soares ^{a,b}

^a Núcleo de Estudos em Manguezais, Departamento de Oceanografia Biológica, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ 20550-013, Brazil
^b Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ 20550-013, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Ecological monitoring
Forest phytosociology
Structural heterogeneity
Vegetation structure
Three-dimensional forest
Precision forestry tools and Structural metrics

ABSTRACT

Mangrove forests present significant structural variations at different spatial and temporal scales, reflecting complex interactions between climatic, hydrological and geomorphological factors. The analysis of these parameters by traditional methods has allowed for the description of the organization, architecture and distribution of species in mangrove ecosystems. In recent years, the use of Terrestrial Laser Scanning (TLS) has been consolidated as an innovative and efficient tool for forest structure studies, standing out for its speed and accuracy. This study aimed to compare the performance of TLS with traditional methods concerning data collection to calculate structural parameters in mangrove forests in southeastern Brazil. The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) was 7.39 % for mean diameter at breast height (DBH), 13.92 % for mean height, 4.74 % for density and 12.58 % for basal area. The Root Mean Square Error (RMSE) was of 8.92 % for mean DBH, 19.57 % for mean height, 6.75 % for density and 15.2 % for basal area. Regression analyses between the methods indicated high correlations, with coefficients of 0.78 (mean DBH), 0.98 (mean height), 0.95 (density) and 0.82 (basal area). These findings point to the potential of using TLS as an effective alternative for the structural characterization of mangrove forests. This method provides significant gains in terms of time savings, increased quality of the collected information and detailed data recording, allowing for its preservation for different analyses in future studies.

1. Introduction

Mangroves are unique coastal ecosystems found in tropical and subtropical regions, at the interface between terrestrial and marine environments, subject to the influence of tides, rivers and geological processes that shape their structural and functional characteristics (Thom, 1984; Twilley, 1995; Twilley et al., 1999).

The structure of mangrove forests varies at different spatial scales, reflecting interactions between climatic, hydrological and geomorphological factors. The formation of latitudinal structural development gradients determined by solar radiation, temperature and precipitation is observed on a global scale (Karlsson, 2008; Schaeffer-Novelli et al., 1990). At regional scales, water balance and tidal range play a crucial role in determining the potential development of forests, while at local

scales, the interaction between tidal inundation frequency, freshwater input and nutrient supply directly influence forest structure (Lugo and Snedaker, 1974; Schaeffer-Novelli et al., 2000; Twilley, 1995; Twilley et al., 1999). In addition, Soares et al. (2003) observed that mangrove forest structure is determined not only by the interaction of environmental characteristics that act on global, regional and local scales, but also reflects the actions and responses of these ecosystems to different types of disturbances. The overlap of all these factors and their dynamic nature (Duke, 2001; Fromard et al., 2004) leads mangrove forests to appear in the form of a structural mosaic (Smith, 1992; Soares et al., 2003). In this sense, the precise characterization of the structure of mangrove forests is essential to understand their ecological attributes, including their functions and dynamics.

Due to their complexity, high structural variability and challenges

* Corresponding author at: Núcleo de Estudos em Manguezais, Departamento de Oceanografia Biológica, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ 20550-013, Brazil.
** Corresponding author.
E-mail addresses: cdamattatatiiane@gmail.com (T.C. Matta), fochaves@gmail.com (F.O. Chaves).

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122567>
Received 12 January 2025; Received in revised form 12 February 2025; Accepted 13 February 2025
Available online 22 February 2025
0378-1127/© 2025 Elsevier B.V. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

APÊNDICE B – Corrigendum do artigo “Evaluating terrestrial laser scanning for structural characterization of Mangrove forests in Southeastern Brazil” publicado em 20 de março de 2025.



Corrigendum

Corrigendum to “Evaluating terrestrial laser scanning for structural characterization of Mangrove forests in Southeastern Brazil” [For. Ecol. Manag. 583 (2025) 1–10]

Tatiane C. Matta ^{a,b,*}, Lucas Silva Pereira ^{a,b}, Yasmin C.B. Belmonte ^a,
Filipe de Oliveira Chaves ^a, Mário Luiz Gomes Soares ^{a,b}

^a Núcleo de Estudos em Manguezais, Departamento de Oceanografia Biológica, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ 20550-013, Brazil

^b Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ 20550-013, Brazil

The authors request that text be included in the funding section of the article. Page 8

*The authors would like to thank FINEP (Brazilian Studies and Projects Financing Agency) for the essential financial support. The Faro Focus 3D S70 equipment used in this study was purchased with funds

from the FINEP - CT Infra project agreement 01.13.0444.08. The University's Postgraduate and Research Sector (PR-2/UERJ) for institutional support and research incentives*.

The authors would like to apologise for any inconvenience caused.

DOI of original article: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122567>.

* Corresponding author at: Núcleo de Estudos em Manguezais, Departamento de Oceanografia Biológica, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ 20550-013, Brazil.

E-mail address: cdamattatiane@gmail.com (T.C. Matta).

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122676>

Available online 20 March 2025

0378-1127/© 2025 Elsevier B.V. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.