



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Uso do LiDAR na Estimativa de Atributos Florestais: Uma Revisão

Adriana Aparecida Megumi Nishiwaki¹, Magna Soelma Beserra de Moura², Josiclêda Domiciano Galvêncio³, Cinthia Pereira de Oliveira⁴, Emanuel Araújo Silva⁵, José Romualdo de Sousa Lima⁶, Antonio Celso Dantas Antonino⁷, Eduardo Soares de Souza⁸, Rômulo Simões Cezar Menezes⁹, Suzana Maria Gico Lima Montenegro¹⁰, Tomas Ferreira Domingues¹¹

¹Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente – UFPE, e-mail: adri_megumi@yahoo.com.br (autor correspondente). ²Pesquisadora da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido), magna.moura@embrapa.br. ³Professora titular da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), josicleda.galvencio@ufpe.br. ⁴Analista em Geoprocessamento e Georreferenciamento da Universidade do Estado do Amapá (UEAP), cinthia.oliveira@ueap.edu.br. ⁵Professor adjunto da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), emanuel.araujo@ufrpe.br. ⁶Professor da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), romualdo.lima@ufape.edu.br. ⁷Professor titular da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), antonio.antonino@ufpe.br. ⁸Professor adjunto da Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST/UFRPE), eduardo.ssouza@ufrpe.br. ⁹Professor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), romulo.menezes@ufpe.br. ¹⁰Professora titular da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), suzanam.ufpe@gmail.com. ¹¹Professor da Universidade de São Paulo (USP), da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto (FFCLRP), tomas@ffclrp.usp.br.

Artigo recebido em 08/10/2022 e aceito em 16/11/2022

RESUMO

Estudos com o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) têm revelado precisão satisfatória nas medições da estrutura de árvores, o que tem contribuído para a compreensão dos ecossistemas florestais, bem como para o fornecimento de dados necessários para a investigação de propriedades biofísicas da floresta. Frente à importância dessa ferramenta, o presente estudo teve como objetivo apresentar uma revisão sobre o LiDAR direcionado para aplicações florestais, e especificamente apresentar suas possibilidades e uso na Caatinga. A varredura a laser tem diversas classificações, uma delas baseia-se na plataforma onde o *scanner* está instalado. Assim, tem-se o laser *scanner* terrestre, que pode ser usado em uma base fixa ou móvel na superfície terrestre; o laser *scanner* aéreo, com o uso de aeronaves tripuladas e não-tripuladas; e o laser *scanner* orbital, localizado em plataformas espaciais. Em escala refinada, a estrutura tridimensional das árvores pode ser detectada pelo LiDAR, e assim se obter importantes informações de traços de espécies vegetais, bem como permitir sua identificação. Ainda, a medição de atributos florestais promovida pelos diferentes tipos de LiDAR tem fornecido dados consistentes de biomassa e carbono florestais, importantes para o desenvolvimento de estudos e monitoramento de estoque de carbono terrestre, o que tem colaborado com as estratégias de redução de efeitos das mudanças climáticas. Na caatinga, o LiDAR tem permitido a contabilização de árvores e a determinação de sua altura e diâmetro da copa, e por conseguinte, a aplicação de equações alométricas para estimativa dos estoques de carbono na vegetação.

Palavras-chave: TLS, ALS, UAV, LiDAR orbital, estrutura florestal, caatinga

Use of LiDAR in Forest Data Estimation: A Review

ABSTRACT

Studies with LiDAR (*Light Detection and Ranging*) have presented satisfactory accuracy on tree structure measurements, which has contributed to the understanding of forest ecosystems, as well as providing the necessary data for the investigation of biophysical properties of the forest. Given the importance of this tool, this study aimed to present a review of LiDAR for forestry applications, and specifically to present its possibilities and uses at the caatinga forest. Laser scanning has several classifications, one of which is based on the platform where the scanner is installed. Thus, there is the terrestrial laser scanner, which can be used on a fixed or mobile basis on the terrestrial surface; the aerial laser scanner, with the use of manned and unmanned aircraft; and the orbital laser scanner, located on space platforms. On a fine scale, the three-dimensional structure of trees can be detected by LiDAR, thus obtaining important information on plant traits, as well as allowing their identification. Furthermore, the measurement of forest attributes promoted by the different types of LiDAR has provided consistent data on forest biomass and carbon, important for the development of studies and monitoring of terrestrial carbon stock, which has collaborated with strategies to reduce the effects of changes climate. In the caatinga, LiDAR has allowed the counting of trees and the determination of their height and crown diameter, and, consequently, the application of allometric equations to estimate carbon stocks in the vegetation.

Keywords: TLS, ALS, UAV, orbital LiDAR, forest structure, caatinga.

Introdução

A análise dimensional da estrutura vertical e horizontal de dosséis florestais representa um fator essencial para a investigação da dinâmica dos ecossistemas terrestres, sendo a representação do dossel diretamente associada aos fluxos de energia, água e carbono entre os compartimentos da vegetação, solo e atmosfera. Os principais processos fisiológicos vegetais são influenciados por propriedades biofísicas da floresta. A quantificação estrutural da floresta possibilita verificar a biomassa e o carbono terrestre nas vegetações, o que tem atendido à necessidade de medições para diversos fins: pesquisa, gestão, conservação e comercial (Ribas, Elmiro, 2013). Não diferente de outros ecossistemas, na caatinga também se utilizam métodos tradicionais para caracterização dos extratos florestais. Assim, a vegetação tem sido contabilizada, medida, pesada e caracterizada por meio de estudos que envolvem diversas pessoas em campo, durante vários dias, utilizando-se de fitas métricas, trenas, hastes, balanças, e demais ferramentas para obtenção de dados das plantas, como largura e comprimento da copa e do tronco; altura da planta; contagem de fustes; biomassa fresca e seca; coleta de amostras para determinação de teores nutricionais em laboratórios, etc. Em geral, são campanhas longas, custosas, que requerem grande esforço físico, humano e financeiro, além de tratar de um método destrutivo, causando impacto direto sobre a vegetação e ecossistema.

Este tipo de estudo tem ganhado outra dimensão. Para monitorar processos ecológicos e obter dados biogeofísicos em diversas escalas espaciais e temporais tem se utilizado o sensoriamento remoto como uma importante ferramenta, o que tem contribuído para a criação de modelos de ecossistemas (Pettorelli et al., 2014; Sun et al., 2019) e outros diversos que visam melhor caracterizar as florestas (Teixeira et al., 2016; Cunha et al., 2020; Ferreira et al., 2020; Miranda et al., 2020; Tan et al., 2021; Medeiros et al., 2022).

Uma das tecnologias de sensoriamento remoto empregada para se obter informações sobre a estrutura da vegetação é o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), que fornece coordenadas tridimensionais de pontos em uma área de estudo por meio da emissão e registro do retorno de pulsos de laser (Becker, Centeno, 2013).

Nos ecossistemas florestais, o uso da tecnologia LiDAR tem se expandido, e os motivos são diversos, mas principalmente devido à celeridade

obtenção de dados de alta resolução, além de fornecer dados espacialmente detalhados referentes aos atributos florestais (Silva et al., 2017). Assim, o LiDAR tem se tornado uma das técnicas mais predominantes para obter diretamente ou estimar atributos florestais, como informações da estrutura das árvores, as quais são indispensáveis para estudo e manejo florestal qualitativo (Andersen, McGaughey, Reutebuch, 2005; Panagiotidis, Abdollahnejad e Slavík, 2022). No Brasil, o LiDAR tem sido aplicado principalmente em áreas de florestas plantadas com *Eucalyptus* sp (Silva et al., 2016; Cosenza et al., 2018; Dalla Corte et al., 2020); na Amazônia (Andersen et al., 2014; Rex et al., 2018; Locks e Matricardi, 2019; Gomes et al., 2020); em manguezais (Galvêncio e Popescu, 2016; Boa Morte, Carvalho e Barros, 2020); porém, de forma muito incipiente para as florestas tropicais sazonalmente secas, como a caatinga (Oliveira et al., 2021).

Diante dessa notoriedade verificada nas últimas décadas para aplicação florestal, o presente estudo teve como objetivo apresentar uma revisão que discorre sobre a tecnologia LiDAR e seus tipos de varredura quanto à plataforma utilizada (terrestre, aéreo e orbital), com ênfase na área florestal, e especificamente apresentar suas possibilidades e usos na Caatinga.

Desenvolvimento

Light Detection and Ranging – Visão geral

O LiDAR é um sistema de varredura a laser, que obtém medidas de distância por meio da luz, operando em faixas espectrais restritas situadas entre a luz visível e infravermelho médio (Ferraz et al., 2016). O processo de emissão é constituído por pulsos de laser em uma plataforma, com alta frequência de repetição. O feixe de laser emitido é direcionado e distribuído por um conjunto ótico formado por espelhos para alcançar a área de cobertura do imageamento, e sequencialmente esse conjunto capta os sinais de retorno, redirecionando-os para o receptor (Giongo et al., 2010; Piazzetta et al., 2017). A Figura 1 apresenta o esquema de funcionamento de LiDAR em área de caatinga, com destaque para a indicação do painel de configuração do equipamento, bem como do espelho responsável pelo direcionamento dos raios para os objetos alvos, no caso, as plantas da caatinga.

O período de retorno dos pulsos entre a plataforma e os alvos é mensurado pelo sensor, fornecendo a estimativa destas distâncias (Giongo

et al., 2010). A área de amostragem do sensor LiDAR no solo é chamada de *footprint*, a qual recebe feixes de laser e retorna a energia refletida ou ecos ao sensor na plataforma (Sheng, 2008).

O tipo de informação obtida do sinal de retorno se diferencia em duas categorias de sensores: (a) o sistema LiDAR de retorno discreto, que registra ecos discretos, de pequeno *footprint* (entre 0,1 e 0,3 m), de uma área de cobertura de

menor extensão, e (b) o sistema LiDAR de *waveform-recording*, que capta a energia retornada em forma de onda contínua ao longo do tempo, com grande *footprint* (entre 8 e 70 m), comumente em uma ampla área de cobertura (Lefsky et al., 2002; Sheng, 2008; Lim et al., 2003, Ioki et al., 2010).

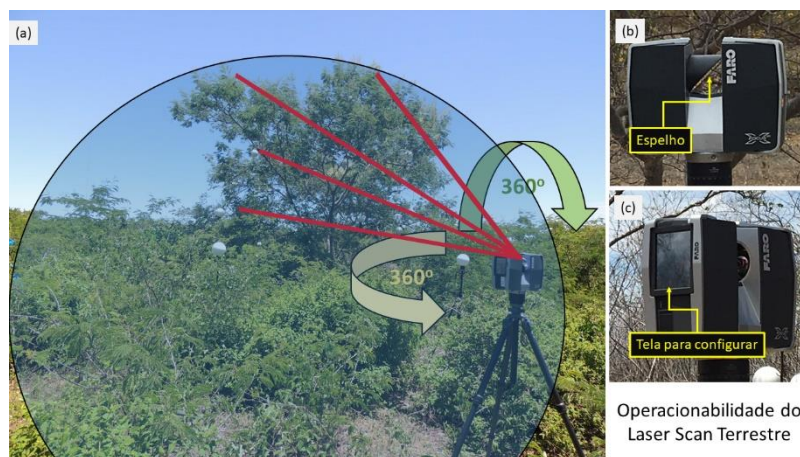


Figura 1. Funcionamento do sistema de varredura a laser terrestre em área de caatinga (a), demonstrando a emissão dos lasers; a delimitação da área de escaneamento em graus, e com indicação do espelho (b) e da tela de configuração (c) do LiDAR. Fotos: Joabe Santos de Almeida (2018) (a); Magna S. B. Moura (2019) (b e c)

Os retornos podem ser manipulados e divididos, sendo os primeiros retornos para a constituição de Modelos Digitais de Superfície (MDS), os últimos retornos para Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de todos os retornos para Modelos Digitais de Elevação (MDE) (Ferraz et al., 2016). Os dados resultam em nuvens de pontos

(Figura 2) que fornecem coordenadas tridimensionais (x, y, z) dos pontos aferidos na superfície escaneada, assim como um valor de intensidade de retorno do sinal (Barber et al., 2003; Ferraz et al., 2016).

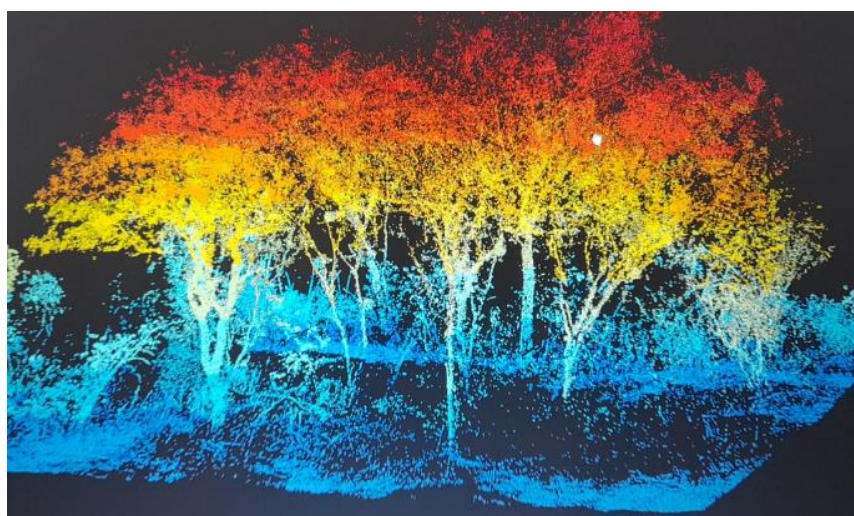


Figura 2. Nuvem de pontos resultante da aplicação de LiDAR terrestre em uma área florestal. Fonte: Adriana A. M. Nishiwaki (2022).

Os sistemas de varredura a laser podem ser classificados em dois tipos: i. sistemas estáticos, que se referem à condição estacionária em que o equipamento coleta os dados, permanecendo em uma posição fixa no terreno; e ii. sistemas dinâmicos, no qual o equipamento movimenta durante obtenção de dados, podendo ser conectado a uma plataforma em movimento (Ferraz et al., 2016). Também podem ser encontradas na literatura outras denominações de categorias dos sistemas de varredura a laser baseadas na plataforma que promove o suporte ao sensor, que são Laser Scanner Terrestre (TLS – *Terrestrial Laser Scanning*), Laser Scanner Aerotransportado (ALS – *Airborne Laser Scanning*) e Laser Scanner Orbital (Soilán et al., 2019), e mais recentemente

tem surgido o Laser Scanner Móvel (MLS - *Mobile Laser Scanner*) (Levick et al., 2021).

Varredura a laser terrestre (TLS)

O TLS refere-se ao sistema estacionário, composto por um dispositivo de LiDAR apoiado sob um suporte, geralmente um tripé (Soilán et al., 2019). No entanto, também em plataforma terrestre, há outro tipo de LiDAR que surgiu recentemente, comparando aos demais, a varredura a laser móvel (*mobile laser scanning – MLS*), cuja plataforma terrestre pode ser veículo motorizado, mochila (*backpack*) ou portátil (*handheld – HMLS*) (Bienert et al., 2018) (Figura 3).



Figura 3. Tipos de suporte de varredura a laser terrestre: (a) tripé; (b) em veículo motorizado; (c) em mochila; (d) de mão. Fonte: (a) Adriana A. M. Nishiwaki (2022); (b) Aijazi et al. (2017); (c) Viametris.com; (d) Cabo et al. (2018).

Comumente, o pulso laser propaga-se na direção horizontal, deslocando-se em breves intervalos angulares. Por meio de um espelho giratório, a cada incremento (horizontal), é lançado pulsos no sentido vertical em intervalos angulares definidos, o que afere as coordenadas dos pontos que refletem o sinal. Portanto, a precisão dos equipamentos na determinação de coordenadas dos pontos depende de sua acurácia na mensuração de distância e ângulos (Silva et al., 2013).

As diversas possibilidades de categorização de TLS podem considerar o princípio de medição e as especificações técnicas obtidas. Não há um *scanner* a laser universal para todas as aplicações possíveis, havendo sensores apropriados para usos externos e outros para usos internos, variando de curto alcance (poucos metros) a longo alcance (até aproximadamente 100 m) (Fröhlich e Mettenleiter, 2004).

Uma das classificações do *laser scanner* encontrada na literatura é baseada no princípio do sistema de medição de distância, a partir do qual podem ser descritas três diferentes tecnologias para aferições de alcance, que são: tempo de voo do sinal ou tempo de voo (*time of flight*); diferença de fase (*phase-difference*) e triangulação (*triangulated scanner*) (Fröhlich e Mettenleiter, 2004; Silva et al., 2013). Há trabalhos que consideram na classificação das técnicas de medição apenas as duas principais categorias (tempo de voo e diferença de fase) (Whyte et al., 2015; Sóilan et al., 2019).

O sistema de medição mais conhecido é a tecnologia de tempo de voo do sinal, a qual se baseia na determinação do intervalo entre a emissão de um pulso e o registro da parcela refletida pela superfície. O tempo que o sinal leva para ir do transmissor até o alvo e voltar ao sistema é aferido e utilizado para determinar a distância entre o sensor e objeto, com o uso da velocidade da luz (Lichti e Harvey, 2002; Wutke e Centeno, 2007). Esta tecnologia permite medições de longa distância de centenas de metros com precisão satisfatória (Fröhlich e Mettenleiter, 2004).

A técnica de diferença de fase, também denominada de *Amplitude Modulated Continuous Wave* (AMCW), permite um alcance de até 100 metros com precisão de medidas de distância de poucos milímetros. Fornece elevadas taxas de amostragem de pontos, entretanto apresenta uma faixa restrita de dados sem ambiguidades (Fröhlich

e Mettenleiter, 2004; Silva et al., 2013). Quanto à triangulação óptica, é utilizada como princípio de medição de distância em usos de curto alcance, de até alguns metros (menor que 5 metros), obtendo precisão em micrômetros (Fröhlich e Mettenleiter, 2004).

O LiDAR terrestre é uma alternativa para obtenção de variáveis dendrométricas (Buck et al., 2017), uma vez que fornece uma perspectiva lateral e gera nuvens de pontos mais densos em relação ao ALS (Chasmer et al., 2006; Murgoitio et al., 2014). A resolução do TLS viabiliza a capacidade para detectar pequenos objetos ou parte de objetos na nuvem de pontos, dado que, tecnicamente, apresenta dois fatores que colaboram para esta capacidade: o menor incremento do ângulo entre dois pontos consecutivos e a dimensão da projeção do raio laser no objeto (Wutke e Centeno, 2007).

Há três modos de obtenção de dados de variáveis dendrométricas, por meio do TLS: varredura única, varredura múltipla e varredura múltipla-única (*multi-single-scan – MSS*). A varredura única consiste em apenas uma varredura de amplo campo de captação (por exemplo 360 graus), a qual é realizada no centro da parcela. Quanto à varredura múltipla, esta é constituída por muitas varreduras feitas no interior e exterior da parcela, as quais são unidas, mediante a identificação de referências artificiais (Figura 4) nas varreduras (Figura 5), para gerar uma nuvem de pontos (Figura 2) representando a parcela. E a varredura múltipla-única (MSS) é semelhante à varredura múltipla, com diferença de utilizar as árvores detectadas nas varreduras como referência para gerar um mapa geral da parcela (Liang et al., 2016).

Com o TLS, cujas varreduras possuem, geralmente, densidades de pontos de dezenas de milhares de pontos por metro quadrado (Brede et al., 2017; Brede et al., 2019), é possível captar com precisão as pequenas árvores do sub-bosque, podendo atingir altas precisões de detecção com varreduras múltiplas (Kankare et al., 2015). A varredura múltipla pode ser vantajosa para fornecer uma representação completa da copa e do tronco de árvores, o que aumenta a densidade e a cobertura de dados que podem potencialmente reduzir o efeito de sombra lateral (Murgoitio et al., 2014).

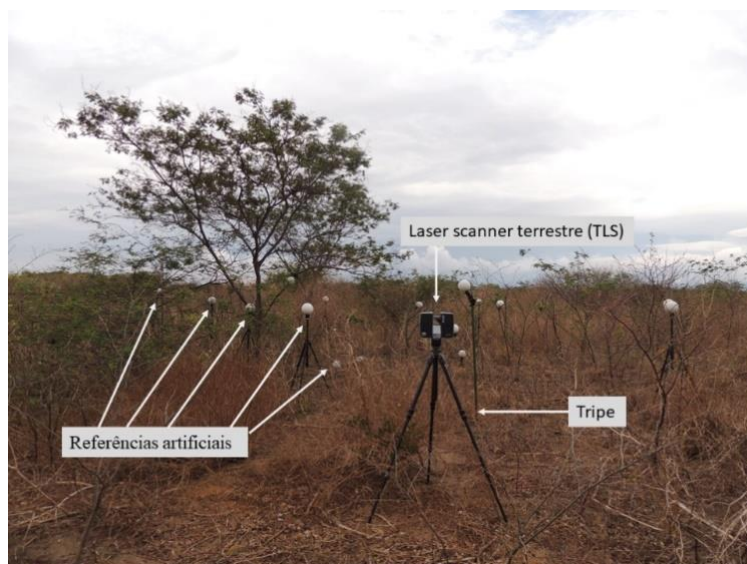


Figura 4. Laser scanner terrestre (TLS) fixo sobre tripe em área de caatinga com indicação de referências artificiais utilizadas para o processamento e registro de múltiplos escaneamentos. Foto: Joabe Santos de Almeida (2018).

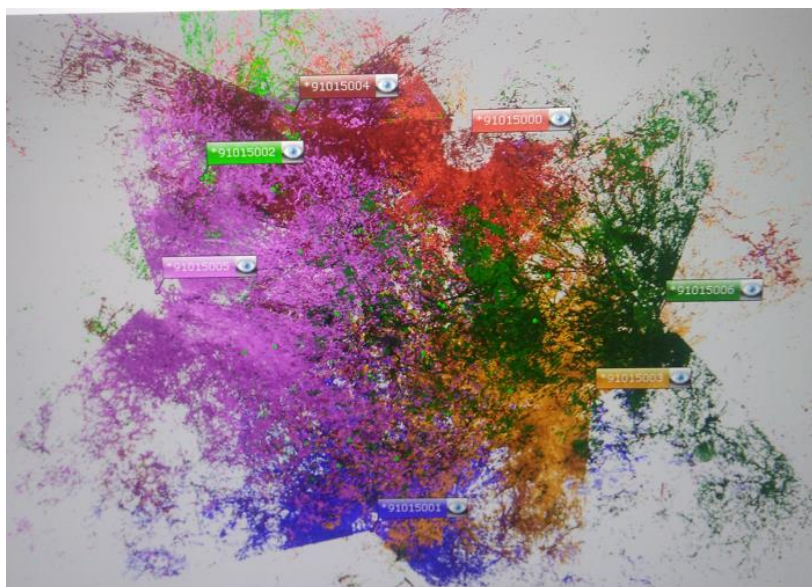


Figura 5. Múltiplas varreduras indicadas pelas diferentes cores, realizadas com o LiDAR terrestre sobre tripé na borda exterior de uma parcela de estudo em área de caatinga, Petrolina, Brasil. Fonte: Adriana A. M. Nishiwaki (2022)

De acordo com Liang et al. (2016), a taxa de detecção reduz conforme a densidade de caules aumenta em uma área. Em áreas com árvores dispersas, com densidade de caules de 200 a 400 caules ha^{-1} , mais de 80% do total das árvores pode ser encontrado. Em áreas com alta densidade de caules, com mais de 1.000 caules ha^{-1} , a taxa de detecção de caules foi em torno de 70%. No caso

da Caatinga, mesmo em áreas com menor densidade de plantas, a dificuldade de detecção reside no fato de muitas espécies apresentarem múltiplos fustes, e caules com diâmetros pequenos em comparação com outras formações florestais nativas e, ou plantadas.

Após o escaneamento, para estimativa de parâmetros florestais é necessário o uso de

algoritmos que possibilitam a automatização das medições desejadas, em diferentes etapas do processamento da nuvem de pontos (Zasada et al., 2013; Buck et al., 2017). Em geral, esses algoritmos tem como primeira etapa a detecção de árvores, as quais são submetidas à modelagem individual para aquisição das predições das variáveis florestais (Buck et al., 2017).

Pontos referentes às árvores exibem, no geral, um padrão específico comparando aos pontos de outro tipo de vegetação. Existem algoritmos que consideram aspectos como distância média entre pontos próximos e retiram pontos que apresentam uma distância maior que a pré-definida. Pode-se associar essa operação com o atendimento do diâmetro máximo aceitável, o que pode excluir diversos pontos (Lingnau et al., 2008).

Muitos métodos associam a predição de diâmetro de fuste com a modelagem dos fustes das árvores. Diversos algoritmos aplicados para esses fins, fundamentam-se na análise de divisões horizontais de nuvens de pontos, nas quais são identificados os fustes de forma circular, empregando o método de transformada de Hough ou outras funções de ajuste de mínimos quadrados de círculo ou cilindro (Bienert et al., 2018; Maas et al., 2008; Cabo et al., 2018).

Heinzel e Huber (2017) detectaram fustes de árvores mediante transformação do espaço *voxel* utilizando técnicas de morfologia matemática tridimensional com critérios de forma e vizinhança. Liang et al. (2014) classificou os pontos pertencentes ao fuste, utilizando os autovetores de cada ponto e da vizinhança. As propriedades de distribuição de pontos, como planicidade e direção do vetor normal, são usadas para diferenciar os pontos do fuste dos outros pontos. E para modelagem do fuste são aplicados, geralmente, a forma de círculo horizontal e de cilindro vertical (Liang et al., 2012). Yrttimaa et al. (2019) realizaram a detecção de árvores, admitindo-se que os pontos no fuste apresentam grandes agrupamentos verticais, comparado aos pontos não-fuste. Para assegurar que os agrupamentos correspondessem as seções transversais das árvores foi empregada uma técnica de filtragem cilíndrica, fundamentada no ajuste de cilindro de RANSAC (*Random Sample Consensus*), o que contribuiu, mediante o atributo de encontrar *inliers*, na estimativa do diâmetro de fuste das árvores. Gollob et al. (2019) utilizaram, para a detecção automatizada de árvores, o algoritmo de agrupamento baseado em densidade local de pontos, o que considera o centro do agrupamento

como máximos de densidade local, os quais são cercados por áreas de menor densidade.

Uma função relevante de qualquer método de modelagem é a segmentação da nuvem de pontos em ramos, o que fornece a estrutura topológica da árvore e os segmentos originados podem ser reestruturados geometricamente (Raumonen et al., 2013). Raumonen et al. (2013) efetuaram a segmentação, utilizando a cobertura da nuvem de pontos com conjuntos de fragmentos (*patches*) conectados e correspondentes na superfície da árvore. A relação de vizinhança dos conjuntos de cobertura estabelece as propriedades de conectividade e as caracterizações geométricas são utilizadas para a identificação de pontos de fuste e de outras áreas. Esses conjuntos dos ramos e galhos foram separados por um processo de reconhecimento de bifurcação. Cada segmento é reconstruído por sequências ajustadas de cilindros (Raumonen et al., 2013). Jaakkola et al. (2010) segmentaram árvores por meio da união de segmentos de linha vertical e a exame de sua dimensão espacial. Já Olofsson et al. (2016), ao invés de segmentar a nuvem de pontos, identificaram os pontos pertencentes ao fuste de árvores calculando o recurso de planicidade de um pequeno grupo de pontos dentro de uma célula de voxel, em substituição do modo ponto a ponto.

De acordo com Conto et al. (2017), para árvores que apresentam fustes bifurcados, como a maioria das espécies da Caatinga, os métodos de redução de ruídos de fuste mais adequados são técnicas baseadas em espaço voxel e na decomposição de vetores dos pontos dos troncos. Nesse mesmo estudo, foi verificado que os métodos de ruídos e de modelagem de fuste apresentaram maior desempenho nas porções inferiores do fuste, por não ocorrer obstrução pelos galhos nessa parte do tronco, o que converge com estudo realizado na Caatinga.

Em tempos atuais, o TLS fornece dados de maior qualidade, dentre todos os dados de nuvens de pontos terrestres no quesito de precisão geométrica e grau de detalhes, entretanto, todas as nuvens de pontos terrestres enfrentam a dificuldade das obstruções das copas das árvores.

O LiDAR de veículos aéreos não tripulado, denominados por VANT ou UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), tem se mostrado como uma tecnologia emergente por possuir atributos robustos das varreduras acima e abaixo do dossel (Liang et al., 2019).

Varredura a laser aéreo

No LiDAR aéreo, o dispositivo é instalado em um veículo aéreo, cuja varredura consiste na combinação da oscilação periódica da direção de emissão do laser com o movimento frontal do veículo (Soilán et al., 2019). O LiDAR aéreo pode ser transportado por aeronaves, sistema conhecido como ALS, ou por veículos aéreos não tripulado

(UAV) (Figura 6a). Nesse sistema de varredura dinâmica são necessários um Sistema de Posicionamento Global (GPS) e uma Unidade de Medição Inercial (IMU) (Figura 6b), que registram a posição e a atitude (rotações) do veículo durante sua trajetória, para obter a posição tridimensional preciso dos dados (Zandoná, Lingnau e Nakajima, 2008; Torre-Tojal et al., 2022).

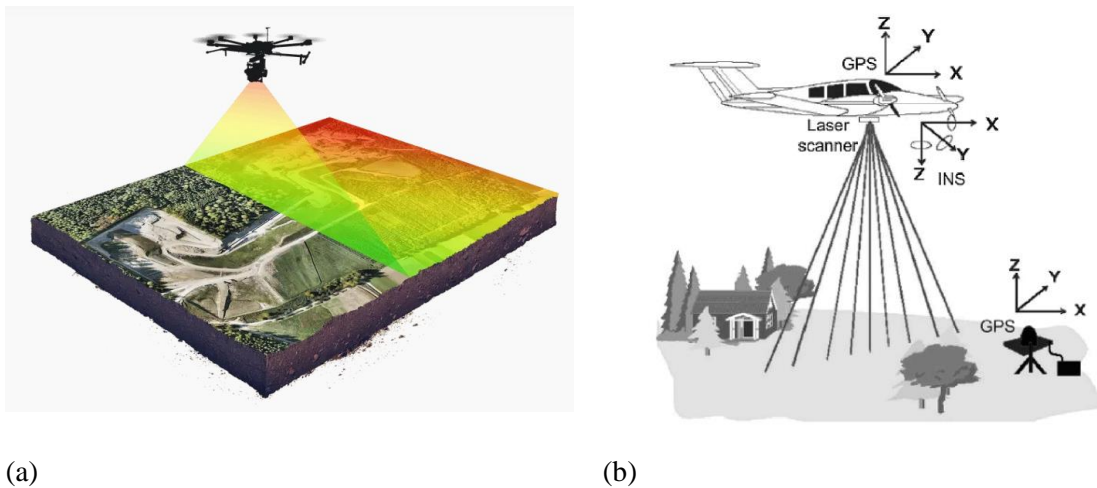


Figura 6. LiDAR aéreo transportado por veículos não tripulado (UAV) (a) e em aeronaves (b). Principais componentes do sistema de varredura a laser aéreo (b). Fonte: (a) wingtra.com; (b) Torre-Tojal et al. (2022)

A largura da faixa de varredura depende do ângulo de varredura e da altitude do voo (Bouvier et al., 2015) (Figura 7). Muitos estudos florestais

têm utilizado o drone como UAV para realização de varredura a laser (Lu et al., 2020; Costa et al., 2021; Peng et al., 2021; Qin et al., 2022).

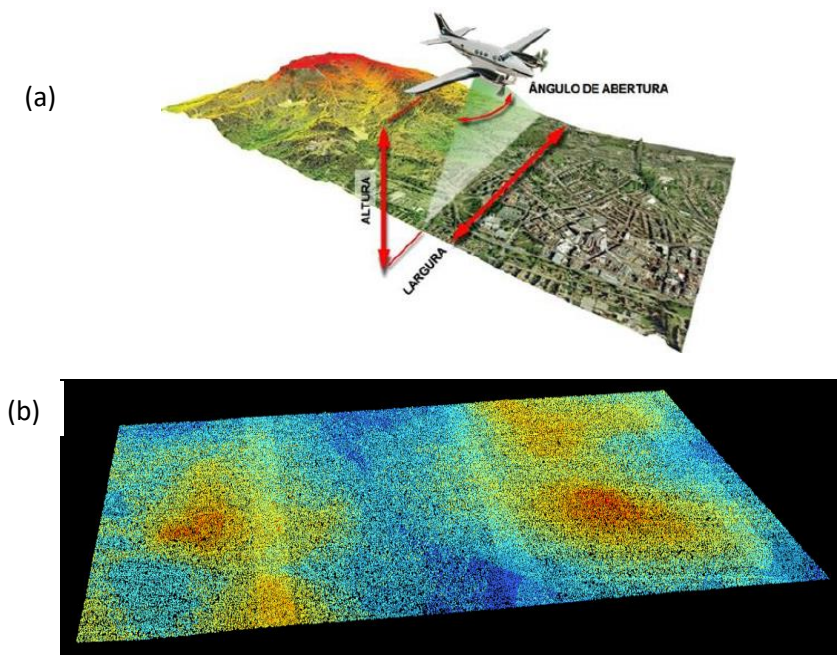


Figura 7. Varredura pelo sistema LiDAR aerotransportado (a); e nuvem de pontos gerada, em uma altitude de voo de 3.068 m, pelo ALS do Programa Pernambuco Tridimensional - PE3D. Fonte: PE3D

O processo de medição dos sistemas ALS e UAV são diferentes quanto à altura do voo, divergência do feixe, comprimento de onda do laser, energia do pulso e ângulo de varredura, o que depende do *scanner*, planejamento de voo e do veículo, impactando, portanto, na densidade de pontos e as disposições de pontos por toda a extensão da altitude (Bruggisser et al. 2019; Morsdorf et al., 2018; Wieser et al., 2016).

Apesar do LiDAR aéreo representar uma tecnologia moderna, erros e tendências nas estimativas são, constantemente, registrados e não há um consenso acerca da melhor metodologia a ser aplicada ao utilizar os dados de LiDAR aéreo. Geralmente, tais metodologias podem ser categorizadas em duas abordagens largamente empregadas: medições em nível de povoamento, tal como abordagem baseada em área (ABA); e abordagem baseada em árvore (individualização de árvore) (Cosenza et al., 2018).

A ABA consiste nas métricas obtidas das nuvens de pontos fornecida pelo escaneamento de parcelas distribuídas em campo, cujos dados são utilizados para ajustar modelos para estimativa de parâmetros florestais (Næsset, 2002; Bouvier et al., 2015; Cosenza et al., 2018). Apesar de sua evidente utilidade para inventário e mapeamento florestal, as ABAs apresentam uma limitação, visto que as métricas utilizadas para configuração da estrutura do povoamento, comumente, são derivadas da distribuição vertical dos retornos do LiDAR, desconsiderando diversos outros parâmetros do dossel, como a heterogeneidade do dossel horizontal (Næsset, 2002; Bouvier et al., 2015).

A abordagem de individualização de árvores fundamenta-se em algoritmos que reconhecem os indivíduos do povoamento por meio de métodos de segmentação ou filtro de máximos locais (LM) (Cosenza et al., 2018), que pressupõem que o maior valor de elevação do laser entre os impactos de laser da mesma copa da árvore é o ápice (Popescu et al., 2002). Dessa forma, os máximos locais (picos) no modelo de altura de dossel (CHM) correspondem ao topo da copa das árvores, o que possibilita a distinção de indivíduos em um povoamento (Popescu et al., 2002; Falkowski et al., 2006). O êxito na identificação da localização da árvore empregando o método LM está sujeito à escolha criteriosa do tamanho da janela do filtro, o que pode resultar em erros de omissão ou inclusão de indivíduos, se a dimensão da janela não for apropriada à estrutura espacial real (Popescu et al., 2002; Popescu e Wynne, 2004; Goerndt et al., 2010). A sobreposição das copas

pode ocasionar erros ao identificar árvores, consequentemente, o desempenho de reconhecimento de indivíduos é baixo em povoamentos complexos (Bouvier et al., 2015). De fato, em áreas de caatinga, onde há grande diversidade de espécies de plantas, com árvores de diferentes tamanhos e arbustos no sub-bosque, além de ocorrência recorrente de duas ou mais espécies, meio que entrelaçadas, esse tipo de erro e comum em nuvens de pontos obtidas por meio de ALS.

Diversos estudos têm revelado que parâmetros florestais, como volume do tronco, biomassa acima do solo (AGB), altura média e diâmetro de fuste, podem ser estimados com alta precisão, utilizando a ABA (Næsset, 2004; Zonete et al., 2010; Silva et al., 2015; Silva et al., 2016), com erros inferiores a 15%, percentual aceitável em inventário de campo (Silva et al., 2015; Silva et al., 2016). Também foi observada uma precisão satisfatória na aplicação da abordagem de individualização de árvores para prever tais parâmetros (Kwak et al., 2007; Oliveira et al., 2012; Macedo et al., 2013; Cosenza et al., 2018).

Segundo Giongo et al. (2010), a tecnologia LiDAR pode efetuar medidas diretas, como alturas do dossel (Sterénczak e Zasada, 2011; Chen et al., 2018; Jamru, 2018; Moe et al., 2020; Cosenza et al., 2020; Dalla Corte et al., 2020; Panagiotidis et al., 2022), número de indivíduos (Hamraz et al., 2016; Jamru, 2018; Cosenza et al., 2018; Millikan et al., 2019; Lu et al., 2020; Nishiwaki et al., 2021), volume e diâmetro de copas (Popescu et al., 2003; Jung et al., 2011; Ferraz et al., 2016; Chen et al., 2018; Panagiotidis et al., 2022), bem como estimativas de variáveis dendrométricas, como por exemplo biomassa (Ene et al., 2017; Fassnacht et al., 2018; Bispo et al., 2020; Novotný et al., 2020; Hernández-Stefanoni et al., 2020; Gao e Zhang, 2021; Chan et al., 2021; Costa et al., 2021), volume (Zonete et al., 2010; Ioki et al., 2010; Silva et al., 2016), e diâmetro na altura do peito (DAP) (Cosenza et al., 2018; Novotny et al., 2020; Dalla Corte et al., 2020; Lu et al., 2020; Panagiotidis et al., 2022).

Os métodos de estimativa de altura total de dosséis florestais podem ser por métodos diretos, que obtém a altura medindo a diferença vertical entre o sinal de retorno do solo e o sinal do topo das árvores, ou por métodos indiretos, por meio de modelos estatísticos que ilustram a relação entre a altura do dossel e as variáveis preditoras derivadas dos dados LiDAR (Wang e Glenn, 2008; Ribas e Elmiro, 2013). Comumente, é utilizado o modelo

digital de altura de copas (CHM), o qual pode ser gerado pela diferença do modelo digital de superfície (MDS) e do modelo digital de terreno (MDT) (Waser et al., 2008; Giongo et al., 2010).

Muitos estudos tem registrado subestimativa de altura das árvores, comparando com as medições de campo (Andersen et al., 2006; Sterénczak et al., 2008; Zandoná et al., 2008; Oliveira et al., 2014; Cosenza et al., 2018), o que pode ser atribuído a diversos fatores como densidade de pontos, densidade e porte dos indivíduos, algoritmos aplicados na geração de MDS e MDT, ausência de correção e calibração do MDS e taxa de penetração dos feixes entre as copas (Giongo et al., 2010; Falkowski et al., 2006; Andersen et al., 2006; Sterénczak e Zasada, 2011; Hansen et al., 2015).

Como exemplos de estudos dessa tendência de subestimativa de altura das árvores, tem-se de Peng et al. (2021), que obtiveram, a partir de dados LiDAR UAV com densidade da nuvem de pontos variando entre 12 e 108 pontos m⁻², em florestas de espécies coníferas e de folhas largas, subestimativas de altura das árvores, com intervalo de RMSE de 3,13 a 4,22 m e RMSEr de 22,78 a 30,69%. Verificaram também que com o aumento da densidade de pontos, a precisão da predição da altura das árvores também aumentou gradualmente, sobretudo em florestas de coníferas. Valor menor de RMSEr (5,85%) foi encontrado por Chen et al. (2018), em estudo utilizando dados ALS de 15,3 pontos m⁻², obtendo também uma subestimativa de altura das árvores de florestas subtropicais. Contribuindo também para essa tendência de subestimativa, Moe et al. (2020) constataram uma correlação (coeficiente de correlação de Pearson - r), entre as medições de altura total observadas em campo e as estimativas de altura resultantes dos dados LiDAR UAV com densidade de 16,07 pontos m⁻², de 0,73, com RMSD igual a 2 e Bias -0,93.

Diferentemente desses resultados, outros trabalhos encontraram superestimativa da altura das árvores como de Galvêncio e Popescu (2016), que obtiveram coeficiente de correlação (r) entre dados observados e estimados a partir de dados ALS de 5,51 pontos m⁻², de 0,60 e RMSE de 2,8 m; assim como do estudo de Dalla Corte et al. (2020), que usaram dados LiDAR UAV de densidade de 1400 pontos m⁻², apresentaram r = 0,91, RMSE = 1,51 m e RMSEr = 7,91%.

A tecnologia ALS apresenta uma limitação na obtenção direta de DAP, visto que os pulsos emitidos são interceptados pelos dosséis antes de

chegarem à base das árvores (Cosenza et al., 2018). Tem-se aplicado modelos de regressão para estimar esse parâmetro a partir da altura das árvores, a qual pode ser estimada diretamente dos dados do ALS (Oliveira et al., 2014), como pode ser visto no estudo de Zhang et al. (2017), no qual foi estimado o DAP por meio de modelo preditivo a partir de dados ALS de 5,06 pontos m⁻², revelando valores de RMSE de 1,67 cm, RMSEr de 11,97% e R²aj de 0,61.

Os padrões hipsométricos, expressões da relação entre altura e diâmetro, podem se distinguir em diferentes tipologias florestais, em uma mesma tipologia florestal para diferentes áreas, e também no interior de uma mesma área, em razão da heterogeneidade ambiental e estrutural, existindo relações hipsométricas divergentes (Martins et al., 2020).

Em relação ao ALS, o LiDAR UAV gera nuvens de pontos com maior densidade, comparáveis às do TLS, o que possibilita uma maior precisão na estimativa de parâmetros florestais, como o diâmetro do fuste. Isso pode ser verificado no estudo de Dalla Corte et al. (2020), que estimaram o DAP de forma direta da nuvem de pontos, exibindo RMSE de 3,46 cm, RMSEr de 11,31% e r de 0,77, assim como no estudo de Panagiotidis et al. (2022), os quais, a partir de dados LiDAR UAV, obtiveram uma superestimativa de DAP com RMSE igual a 7,7 cm, RMSEr de 23,4% e Bias de 3,5 cm.

O LiDAR destaca-se, dentre os métodos de predição de biomassa acima do solo de florestas, por possibilitar medições precisas da estrutura florestal (Novotny et al., 2020), como pode ser observado no estudo de Chan et al. (2021), que verificaram um alto desempenho dos modelos preditivos de AGB da vegetação de uma floresta subtropical mista, com R² igual a 0,864 e RMSE de 37,75 kg ha⁻¹. Maior precisão de estimativa de AGB foi encontrado no estudo de Lu et al. (2020), que por meio de modelos ajustados pelo método de aprendizado de máquina (*Random Forest*), apresentaram R² entre 0,91 e 0,95, RMSE entre 3,99 e 4,65 Mg ha⁻¹ e RMSEr entre 6,5 e 10,6%. Dentro desse intervalo de precisão, os estudos de Silva et al. (2017), realizado em plantações de pinheiros, e de Silva et al. (2019), feito no Cerrado, encontraram, respectivamente, os seguintes resultados: R² = 0,93, RMSE = 5,71 Mg ha⁻¹ e RMSEr = 12,64%, e R² de 0,96 a 0,97 e RMSEr de 16,92 a 20,49.

Varredura a laser orbital

Poucos sistemas LiDAR operaram no espaço, em virtude das demandas de alta potência, elevados custos e disponibilidade de fontes de laser robustas (Salas, 2021; Farid et al., 2006).

Antes do satélite LiDAR pioneiro ser lançado (ICESat - *Ice, Cloud and land Elevation Satellite*), que ocorreu, na década de 1990, uma tentativa da missão *Vegetation Canopy LiDAR* (VCL) da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), que em razão de certas questões de viabilidade, como custos altos dos testes e o desenvolvimento ultrapassado, foi interrompida (Salas, 2021). A finalidade principal do VCL foi obter a caracterização da estrutura 3D da Terra, principalmente, estrutura vertical e horizontal do dossel e topografia da superfície, o que geraria dados relevantes para compreensão de questões ambientais, como mudança e variabilidade climática, erosão biótica, e uso sustentável da terra, assim como estimativa de estoque de biomassa e de carbono, cobertura florestal (Dubayah et al., 2010).

No ICESat, foi instalado o sensor LiDAR espacial *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS), que forneceu, durante o período de 2003 a 2009, dados globais contínuos, especificamente, referentes às medições de topografia do manto de gelo, assim como dados relativos às propriedades atmosféricas e das nuvens, além de informações e dados de topografia e vegetação no mundo inteiro (NASA, 2010). Apesar de não terem sido planejados diretamente para usos florestais, os dados do GLAS foram utilizados para essas aplicações (Lefsky et al., 2006; Nelson et al., 2009; Duncanson et al., 2010).

A missão sucessora do ICESat, ICESat-2, entrou em operação em 2018, e carrega o instrumento *Advanced Topographic Laser Altimeter System* (ATLAS), que coleta dados mais detalhados e precisos, comparado à missão anterior, das alturas do gelo, vegetação, superfície terrestre, água e nuvens. Outro aperfeiçoamento dessa missão é o número maior de pulsos emitidos, que consiste em 10.000 pulsos por segundo, diferente dos 40 pulsos emitidos pela ICESat. Aproximadamente 20 trilhões de fótons partem do ATLAS a cada pulso, e somente, em torno de 12 fótons retornam ao telescópio do satélite. Programas de computador podem calcular o tempo de viagem e com a velocidade da luz, estimar a distância percorrida pelo fóton (NASA, s.d.).

Tais como os usos dos dados do GLAS/ICESat, os dados do ATLAS/ICESat-2 também resultaram em estudos referentes às

estruturas de ecossistemas florestais, tais como estimativa de altura do dossel e AGB (Popescu et al., 2018; Neuenschwander, Magruder, 2019; Narine et al., 2020; Neuenschwander et al., 2020; Mulverhill et al., 2022), embora o objetivo principal da missão seja obter medições da criosfera.

Também em 2018, foi lançado o instrumento *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI), o qual foi instalado na *International Space Station* (ISS) para uma missão de dois anos. O LiDAR GEDI tem como objetivo geral fornecer observações globais de alta resolução das estruturas florestais, o que o torna pioneiro em focar as medições das vegetações (Salas, 2021; Dubayah et al., 2020). A razão de sua missão baseia-se nas respostas da biomassa terrestre às mudanças climáticas e ao manejo do solo (Salas, 2021). As observações do GEDI são utilizadas para gerar dados acerca da altura e cobertura do dossel, perfil vertical, índice da área foliar, topografia, AGB, entre outros (Dubayah et al., 2020; Tang et al., 2012).

GEDI é um sensor do tipo *waveform-recording*, com *footprint* de diâmetro próximo de 25 m (Leite et al., 2022). A sua varredura quantifica a distribuição vertical da floresta mediante o registro da quantidade de energia do laser refletida pela vegetação em diferentes alturas (Dubayah et al., 2020). Esse sensor possui uma alta capacidade de penetração em vegetação (até 99% da cobertura do dossel), viabilizando, dessa forma, a coleta de dados em florestas densas, o que não é possível por outros sistemas LiDAR orbital anteriores (Leite et al., 2022).

A ideia da missão do GEDI envolve como resultado um produto global de AGB com resolução espacial de 1 km, cuja escala se encontra dentro das escalas consideradas precisas para mapeamento de AGB, atingindo uma precisão de cerca de 20% (Hall et al., 2011; Dubayah et al., 2020; Leite et al., 2022). Para Leite et al. (2022), é presumido que essas estimativas de AGB se tornem referência global de AGB florestal, importante para calcular os estoques de carbono mundial. Ademais, estudos da área florestal tem aplicado métricas derivadas do GEDI para estimativa de AGB (Duncanson et al., 2020; Duncanson et al., 2022, Chen et al., 2022), de altura do dossel (Hancock et al., 2019; Guerra-Hernandez e Pascual, 2021; Gupta e Sharma, 2022, Liu et al., 2022) de carga de combustível (Leite et al., 2022), de estrutura do dossel (Marselis et al., 2018; Schneider et al., 2020;

Marselis et al., 2022, Dhargay et al., 2022; Rishmawi et al., 2022).

Semelhante ao GEDI, por possuir missão relacionada a coleta de dados de vegetação, o *Multi-footprint Observation LiDAR and Imager* (MOLI), instalado no ISS em módulo experimental japonês (JEM), tem como objetivos principais, além de coletar dados de biomassa florestal, os dados de nível do mar costeiro, de topografias da geleira, da superfície terrestre e da dinâmica do oceano (Salas, 2021; WMO, 2021). Além do LiDAR, outro instrumento presente no MOLI é o

gerador de imagens (*imager*) que consiste em bandas RGB, uma largura de faixa de 500 m, em uma resolução de solo de 5 m (Salas, 2021). O objetivo principal do *imager* é o fornecer informações sobre biomassa, cobertura do solo, índice de área foliar, índice de vegetação por diferença normalizada, tipos de solo e de vegetação (WMO, 2021).

No Quadro 1, estão disponíveis os endereços dos bancos de dados dos principais produtos de LiDAR orbital.

Quadro 1. Principais bases de dados com produtos de LiDAR orbital e respectivos endereços eletrônicos para acesso e download.

LiDAR	Satélite	Link de acesso
GEDI	ISS GEDI	https://gedi.umd.edu/data/download/
GLAS	ICESat	https://nsidc.org/data/icesat/data
ATLAS	ICESat-2	https://maps.ga.lsu.edu/lidar2000/

LiDAR e suas aplicações na Floresta Tropical Sazonalmente Seca de Caatinga

Para a caatinga, ainda há poucas aplicações florestais do LiDAR. Entretanto uma base de dados de ALS, o Pernambuco Tridimensional (PE3D), tem auxiliado na difusão da tecnologia como ferramenta de levantamento de dados.

A base de dados do PE3D é resultante do levantamento aerofotogramétrico e perfilamento a laser realizado em todo o território do estado de Pernambuco. Foram feitos dois mapeamentos, um na escala 1:5.000, que abrangeu todo o território do estado; e outro na escala de 1:1.000, o qual compreendeu áreas urbanas de 26 municípios pernambucanos, tendo como dados gerados MDT e MDE, nos formatos raster e xyz, assim como ortofotos e imagens hipsométricas. O PE3D foi criado inicialmente para auxiliar projetos de prevenção e controle de inundações, e atualmente integra o Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE). Os dados disponíveis do PE3D podem ser aplicados para diversos fins, como identificação de áreas de risco e danos aos recursos naturais, controle de expansão urbana, planejamento do uso do solo, estimativa de biomassa vegetal, dentre outros (PERNAMBUCO, 2016).

Em 2017 foi defendida uma dissertação intitulada “Avaliação espacial de espécies vegetais

em áreas de Caatinga com dados LiDAR”, na qual foram utilizados dados do PE3D, com densidade de 0,5 pulsos m⁻². Nesse estudo, foi revelada eficácia na detecção de indivíduos florestais, com 98% de acerto do número de árvores, e na estimativa de altura média, com 96% de acerto e desvio padrão de 0,08. Também se verificou eficiência na predição de biomassa acima do solo, com resultados que foram compatíveis com os dados de altura total e diâmetro ao nível do peito (DAP), e com variações esperadas, tendo em vista as mudanças no porte das árvores entre as datas do imageamento e das medições em campo (Gomes, 2017).

Outros estudos com dados do PE3D foram feitos por Nishiwaki et al. (2021), Oliveira (2021) e Silveira et al. (2018). Além dos dados de ALS, Silveira et al. (2018) usaram dados do sensor MSI/Sentinel-2 para mapeamento de fitofisionomias da caatinga, o que indicaram otimização na classificação da Caatinga arbórea com a aplicação das métricas de LiDAR, sobretudo em parcela de cobertura vegetal com altura das plantas acima de 5 m, a elevação do terreno e o desvio padrão da altura da vegetação. No estudo de Oliveira et al. (2021), a biomassa acima do solo (AGB) e o carbono foram estimados a partir de dados LiDAR e de medidas de campo, considerando indivíduos vegetais com DAP ≥ 6 cm

em 40 parcelas de 400 m² em áreas da Caatinga. O desempenho dos seus modelos de estimativa de carbono apresentou R²_{aj} entre 0,17 e 0,53 e RMSE entre 3,18 e 28,45 Mg ha⁻¹.

Nishiwaki et al. (2021) realizaram medidas de campo em 180 indivíduos, em cinco parcelas de caatinga em Petrolina, PE, e avaliaram diferentes métodos para detecção de árvores e suas respectivas alturas. Estes autores verificaram que, com base na relação entre os diâmetros de copa e as alturas totais dos indivíduos da área de estudo, o uso de nuvens de baixa densidade de pontos para detecção de indivíduos demonstrou-se inferior comparado ao uso de CHM. Também observaram que o método de suavização com resolução de 0,5 m apresentou melhor resposta na identificação das árvores; enquanto o método *pitfree* apresentou resultados significativos na estimativa de altura das árvores.

Com o avanço das ferramentas e métodos de análises há cada vez mais pacotes escritos em R e em Python que permitem a realização de análise de nuvens de pontos de produtos LiDAR, mesmo com poucos dados oriundos de TLS para a caatinga.

O desempenho do TLS na Caatinga foi verificado por Barmpoutis et al. (2018), os quais propuseram um método de análise estrutural tridimensional de árvores/arbustos tropicais da Caatinga e de identificação de espécies desse bioma. Para extrair o “esqueleto” das árvores (Figura 8) foi aplicado o método chamado *Fast Marching Method* - FMM. O algoritmo proposto obteve uma taxa de classificação real de 80%, e uma precisão de detecção com uso de quatro descritores de 86,6%.

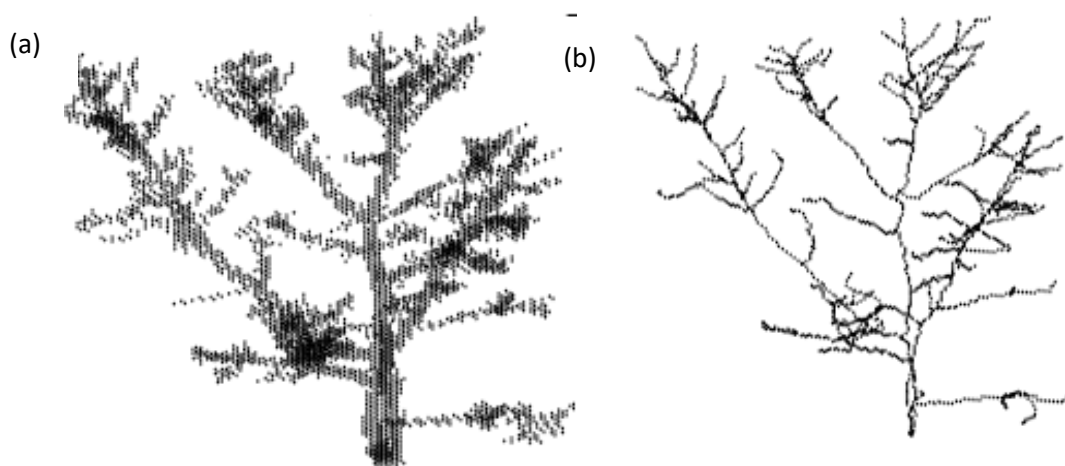


Figura 8. “Esqueleto” de *Sapium glandulosum* obtido pelo *Fast Marching Method* - FMM (b), a partir da nuvem de pontos (a) resultante do terrestre laser scanner. Fonte: Barmpoutis et al. (2018)

Assim como o ALS e o TLS, o uso do LiDAR orbital é incipiente na Caatinga. Castanho et al. (2020) utilizaram as métricas de *waveform* do GLAS, em combinação com outros dados de sensoriamento remoto, para estimativa de biomassa da floresta tropical seca da Caatinga, bem como realizaram comparações com observações de campo. As estimativas de satélite capturaram a grande variabilidade da biomassa nas diversas fisionomias, que foi de 2 a 272 Mg ha⁻¹, além de revelar que no ano 2000, aproximadamente 50% da área apresentou biomassa abaixo de 2 Mg ha⁻¹ e, que 86% da biomassa está concentrada em 27% da região.

Saatchi et al. (2011) realizaram um mapeamento de estoque de C florestal em três

regiões tropicais continentais, incluindo a Caatinga, utilizando também dados do GLAS e outros dados de sensoriamento remoto. Estes autores estimaram um total de 247 Gt de C, sendo 193 Gt de carbono armazenado acima do solo e 54 Gt de carbono nas raízes das árvores, que corresponderam a 49% das florestas da América Latina, 25% da África Subsaariana e 26% do Sudeste Asiático.

Conclusões

Cada categoria do LiDAR, tendo em vista suas propriedades funcionais particulares, possui seus pontos fortes e limitações no uso para caracterização tridimensional das árvores, e dessa forma, todas elas contribuem para a consolidação

dessa tecnologia de sensoriamento remoto para fins de inventário florestal.

Nas últimas décadas, o LiDAR, em suas três categorias, tem progredido e conquistado mais espaço na área ambiental, por ter demonstrado, a capacidade de coletar características da vegetação de modo robusto e confiável. Diante dos graves efeitos das mudanças climáticas globais, cada vez mais notada em todo o mundo com a ocorrência de eventos extremos, tal capacidade tem sido explorada para atender à necessidade urgente de estudos e levantamentos consistentes de estoque de carbono, de biodiversidade e outros dados relevantes, fundamentando, assim, estratégias viáveis para conservação do carbono florestal e de habitats de diversas espécies, e planos de manejo diversos.

Na Caatinga, o LiDAR tem se mostrado uma tecnologia promissora, apesar da heterogeneidade morfológica de sua vegetação e da predominância de arbustos na região, mas devido a isso, deve-se considerar alguns aspectos, que promovem maior detalhamento de suas estruturas florestais, como a densidade de pontos na nuvem de pontos e a varredura por indivíduos. A densidade de espécies multi fustes promove um bloqueio na passagem dos lasers, resultando em maior dificuldade para aplicações do TLS, e por conseguinte, menor eficiência para obtenção de dados para inventário florestal por meio do LiDAR. Entretanto, as nuvens de pontos obtidas em nível de indivíduo tem-se mostrado capazes de serem utilizadas para identificação de espécies da caatinga, e assim também podem ser usadas para a obtenção de diversos atributos florestais.

O avanço dos estudos com a tecnologia LiDAR pode trazer importantes quantificações do carbono florestal, e para cobrir extensas áreas da caatinga, o uso de produtos LiDAR em escala regional ou global, como os proporcionados pelos satélites são essenciais. Em contrapartida, a possibilidade de uso do LiDAR disponível em aparelhos de celular é uma realidade facilmente aplicável para parcelas menores, visando a obtenção de forma rápida, de medidas como diâmetro dos troncos e altura das plantas.

Esta revisão discorre sobre alguns aspectos da tecnologia LiDAR, apresentando informações relacionadas aos tipos de varredura quanto à plataforma utilizada (terrestre, aéreo e orbital). Aborda também suas aplicações na área florestal, com destaque para alguns métodos de processamento utilizados em dados de LiDAR aérea e terrestre obtidos para áreas de Caatinga,

uma formação florestal sazonalmente seca, constituída por espécies arbustivas e arbóreas, em sua maioria com troncos finos e multi fustes, que perdem a quase totalidade das folhas no período seco. Porém, com grande importância e eficiência na fixação de carbono atmosférico, mesmo sob condições de deficiência hídrica e elevadas temperaturas. O LiDAR pode agregar refinamento nas análises florestais da caatinga, visando estudos futuros de compartimentação de carbono, tratos vegetais, modelagem de ecossistema, cobertura do solo, biomassa, índice de área foliar, dentre outros.

Agradecimentos

Ao Observatório da Dinâmica de Água e Carbono no Bioma Caatinga (ONDACBC) pela concessão da bolsa de estudo do INCT/CNPq/CAPES e à Embrapa Semiárido e ao Projeto Nordeste: Uma nova ciência para um importante, porém negligenciado bioma (FAPESP-NERC-BIOME) pelo apoio técnico e instrumental. À FAPESP pelo financiamento do projeto de nº 50.488-5 e a John Lloyd por coordenar esse projeto. J.D.G.; J.R.S.L.; E.S.S.; R.S.C.M. e S.M.G.L.M. agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa. Ao projeto Universal MCTIC/CNPq 28/2018 (Proc. 431980/2018-7)

Referências

- Aijazi, A.K., Checchin, P., Malaterre, L., Trassoudaine, L., 2017. Automatic detection and parameter estimation of trees for forest inventory applications using 3D terrestrial LiDAR. *Remote Sensing* [online] 9. Disponível: 10.3390/rs9090946. Acesso: 10 jul. 2022.
- Andersen, H.E., Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne LiDAR and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing* [online] 32. Disponível: 10.5589/m06-030. Acesso: 5 jul. 2022.
- Andersen, H.-E., Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., d'Oliveira, M.V.N., Keller, M., 2014. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. *Remote Sensing of Environment* [online] 151. Disponível: 10.1016/j.rse.2013.08.049. Acesso: 5 jul. 2022.
- Barber, D.M., Mills, J.P., Bryan, P.G., 2003. Towards a standard specification for terrestrial laser scanning. *International Archives of*

- Photogrammetry and Remote Sensing, 34, 619-624.
- Barmoutis, P., Stathaki, T., Lloyd, J., Moura, M.S.B., Carvalho, H.F.S., 2018. LiDAR technology and linear dynamical systems for classification of tropical tree species. In: International Conference on Wood Science and Technology, 29. Zagreb: University of Zagreb.
- Becker, J.H., Centeno, J. A. S., 2013. Avaliação de métodos de filtragem de nuvem de pontos derivados do sistema laser scanner aerotransportado para obtenção de MDT. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 65. Disponível: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43850>. Acesso: 05 jul. 2022.
- Biernet, A., Georgi, L., Kunz, M., Maas, H., Oheimb, G., 2018. Comparison and combination of mobile and terrestrial laser scanning for natural forest inventories. *Forest* [online] 9. Disponível: 10.3390/f9070395. Acesso: 9 jul. 2022.
- Bispo, P.C., Rodríguez-Veiga, P., Zimbres, B., Miranda, S.C., Cezare, C.H.G., Fleming, S., Baldacchino, F., Louis, V., Rains, D., Garcia, M., Espírito-Santo, F., Roitman, I., Pacheco-Pascagaza, A.M., Gou, Y., Roberts, J., Barrett, K., Ferreira, L.G., Shimbo, J.Z., Alencar, A., Bustamante, M., Woodhouse, I.H., Sano, E.E., Ometto, J.P., Tansey, K., Balzter, H., 2020. Woody aboveground biomass mapping of the brazilian savanna with a multi-sensor and machine learning approach. *Remote Sensing* [online] 12. Disponível: 10.3390/rs12172685. Acesso: 17 jul. 2022.
- Boa Morte, C.L., Carvalho, L.F.S.G., Barros, R.S., 2020. Uso de vant como ferramenta para estimativa de altura de dossel em manguezal: Um estudo investigativo em Guaratiba, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Tamoios* [online] 16. Disponível: 10.12957/tamoios.2020.55745. Acesso: 7 jul. 2022.
- Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., 2001. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. CIPA Working Group VI [online]. Disponível: <https://www.isprs.org/PROCEEDINGS/XXXI/V/5-C7/pdf/2001-11-wb01.pdf>. Acesso: 15 jul. 2022.
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R.A., Renaud, J., 2015. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* [online] 156. Disponível: 10.1016/j.rse.2014.10.004. Acesso: 12 jul. 2022.
- Brede, B., Lau, A., 2017. Bartholomeus, H. M.; Kooistra, L. Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR derived canopy height and DBH with terrestrial LiDAR. *Sensors* [online] 17. Disponível: 10.3390/s17102371. Acesso: 11 jul. 2022.
- Brede, B., Calders, K., Lau, A., Raunonen, P., Bartholomeus, H. M., Herold, M., Kooistra, L., 2019. Non-destructive tree estimation through quantitative structure modelling: Comparing UAV laser scanning with terrestrial LiDAR. *Remote Sensing of Environment* [online] 233. Disponível: 10.1016/j.rse.2019.111355. Acesso: 11 jul. 2022.
- Bruggisser, M., Hollaus, M., Kükenbrik, D., Pfeifer N., 2019. Comparison of forest structure metrics derived from UAV LiDAR and ALS data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online] 4. Disponível: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-325-2019. Acesso: 13 jul. 2022.
- Buck, A.L.B., Lingnau, C., Machado, A.M.L., Péllico Netto, S., 2017. Detecção de árvores em nuvens de pontos de varredura laser terrestre. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 23, 21-38.
- Cabo, C., Del Pozo, S., Rodríguez-González, P., Ordóñez, C., González-Aguilera, D., 2018. Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. *Remote Sensing* [online] 10. Disponível: 10.3390/rs10040540. Acesso: 11 jul. 2022.
- Chan, E.P.Y., Fung, T., Wong, F.K.K., 2021. Estimating above-ground biomass of subtropical forest using airborne LiDAR in Hong Kong. *Scientific Reports* [online] 11. Disponível: 10.1038/s41598-021-81267-8. Acesso: 17 jul. 2021.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., Treitz, P., 2006. Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. *Canadian Journal of Remote Sensing* [online] 32. Disponível: 10.5589/m06-011. Acesso: 10 jul. 2022.
- Chen, W., Hu, X., Chen, W., Hong, Y., Yang, M., 2018. Airborne LiDAR remote sensing for individual tree forest inventory using trunk detection-aided mean shift clustering techniques. *Remote Sensing* [online] 10.

- Disponível: 10.3390/rs10071078. Acesso: 15 jul. 2022.
- Chen, L., Ren, C., Bao, G., Zhang, B., Wang, Z., Liu, M., Man, W., Liu, J. 2022. Improved object-based estimation of forest aboveground biomass by integrating LiDAR data from GEDI and ICESat-2 with multi-sensor images in a heterogeneous mountainous region. *Remote Sensing* [online] 14. Disponível: 10.3390/rs14122743. Acesso: 20 jul. 2022.
- Conto, T., Olofsson, K., Gorgens, E.B., Rodriguez, L.C.E., Almeida, G., 2017. Performance of stem denoising and stem modelling algorithms on single tree point clouds from terrestrial laser scanning. *Computers and Electronics in Agriculture* [online] 143. Disponível: 10.1016/j.compag.2017.10.019. Acesso: 14 jul. 2022.
- Cosenza, D.N., Soares, V.P., Leite, H.G., Gleriani, J. M., Amaral, C.H., Gripp Júnior, J., Silva, A.A. L., Soares, P., Tomé, M., 2018. Airborne laser scanning applied to Eucalyptus stand inventory at individual tree level. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [online] 53. Disponível: 10.1590/S0100-204X2018001200010. Acesso: 14 jul. 2022.
- Cosenza, D.N., Pereira, L.G., Guerra-Hernández, J., Pascual, A., Sores, P., Tomé, M., 2020. Impacto f calibrating filtering algorithms on the quality of LiDAR-derived DTM and on forest attribute estimation through area-based approach. *Remote Sensing* [online] 12. Disponível: 10.3390/rs12060918. Acesso: 15 jul. 2022.
- Costa, M.B.T., Silva, C.A., Broadbent, E.N., Leite, R.V., Mohan, M., Liesenberg, V., Stoddart, J., Amaral, C.H., Almeida, D.R.A., Silva, A.L., Goya, L.R.R.Y., Cordeiro, V.A., Rex, F., Hirsch, A., Marcatti, G.E., Cardil, A., Mendonça, B.A.F., Hamamura, C., Dalla Corte, A.P., Matricardi, E.A.T., Hudak, A.T., Zambrano, A.M.A., Valbuena, R., Faria, B.L., Silva Junior, C.H.L., Aragão, L., Ferreira, M. E., Liang, J., Carvalho, S.P.C., Klauber, C., 2021. Beyond trees: Mapping total aboveground biomass density in the Brazilian savanna using high-density UAV-lidar data. *Forest Ecology and Management* [online] 491. Disponível: 10.1016/j.foreco.2021.119155. Acesso: 13 jul. 2022.
- Cunha, J., Nóbrega, R.L.B., Rufino, I., Erasmi, S., Galvão, Carlos, Valente, F., 2020. Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: Evidence from the Brazilian Caatinga. *Remote Sensing of Environment*.
- Dalla Corte, A.P., Rex, F.E., Almeida, D.R.A., Sanquetta, C.R., Silva, C.A., Moura, M.M., Wilkinson, B., Zambrano, A.M.A., Cunha Neto, E.M., Veras, H.F.P., Moraes, A., Klauber, C., Mohan, M., Cardil, A., Broadbent, E.N., 2020. Measuring individual tree diameter and height using GatorEye high-density UAV-LiDAR in an integrated crop-livestock-forest system. *Remote Sensing* [online] 12. Disponível: 10.3390/rs12050863. Acesso: 15 jul. 2022.
- Dhargay, S., Lyell, C.S., Brown, T.P., Inbar, A., Sheridan, G.J., Lane, P.N.J., 2022. Performance of GEDI Space-Borne LiDAR for Quantifying Structural Variation in the Temperate Forests of South-Eastern Australia. *Remote Sensing* [online] 14. Disponível: 10.3390/rs14153615. Acesso: 21 jul. 2022.
- Dubayah, R.O., Sheldon, S.L., Clark, D.B., Hofton, M.A., Blair, J.B., Hurtt, G.C., Chazdon, R.L., 2010. Estimation of tropical forest height and biomass dynamics using lidar remote sensing at La Selva, Costa Rica. *Journal of Geophysical Research* [online] 115. Disponível: 10.1029/2009JG000933, 2010. Acesso: 18 jul. 2022.
- Dubayah, R., Blair, J.B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., Hofton, M., Hurtt, G., Kellner, J., Luthcke, S., Armston, J., Tang, H., Duncanson, L., Hancock, S., Jantz, P., Marselis, S., Patterson, P.L., Qi, W., Silva, C., 2020. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing* [online] 1. Disponível: 10.1016/j.srs.2020.100002. Acesso: 19 jul. 2022.
- Duncanson, L.I., Niemann, K.O., Wulder, M.A., 2010. Estimating forest canopy height and terrain relief from GLAS waveform metrics. *Remote Sensing of Environment* [online] 114. Disponível: 10.1016/j.rse.2009.08.018. Acesso: 18 jul. 2022.
- Duncanson, L., Neuenschwander, A., Hancock, S., Thomas, N., Fatoyinbo, T., Simard, M., Silva, C.A., Armston, J., Luthcke, S.B., Hofton, M., Kellner, J.R., Dubayah, R., 2020. Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California. *Remote Sensing of Environment* [online] 242. Disponível:

- 10.1016/j.rse.2020.111779. Acesso: 20 jul. 2022.
- Duncanson, L., Kellner, J.R., Armston, J., et al., 2022. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. *Remote Sensing of Environment* [online] 270. Disponível: 10.1016/j.rse.2021.112845. Acesso: 20 jul. 2022.
- Ene, L.T., Naesset, E., Gobakken, T., Bollandsas, O.M., Mauya, E.W., Zahabu, E., 2017. Large-scale estimation change in aboveground biomass in miombo woodlands using airborne laser scanning and national forest inventory data. *Remote Sensing of Environment* [online] 188. Disponível: 10.1016/j.rse.2016.10.046. Acesso: 16 jul. 2022.
- Falkowski, M.J., Smith, A.M.S., Hudak, A.T., Gessler, P.E., Vierling, L.A., Crookston, N.L., 2006. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of LiDAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing* [online] 32. Disponível: 10.5589/m06-005. Acesso: 14 jul. 2022.
- Farid, A., Goodrich, D.C., Sorooshian, S., 2006. Using Airborne Lidar to Discern Age Classes of Cottonwood Trees in a Riparian Area. *Western Journal of Applied Forestry* [online] 21. Disponível: doi.org/10.1093/wjaf/21.3.149. Acesso: 18 jul. 2022.
- Fassnacht, F.E., Latifi, H., Harting, F., 2018. Using synthetic data to evaluate the benefits of large field plots for forest biomass estimation with LiDAR. *Remote Sensing of Environment* [online] 213. Disponível: 10.1016/j.rse.2018.05.007. Acesso: 16 jul. 2022.
- Ferraz, R.S., Souza, S.F., Reis, M.L.L., 2016. Laser scanner terrestre: teoria, aplicações e prática. *Revista Brasileira de Geomática* [online] 4. Disponível: 0.3895/rbgeo.v4n2.5502. Acesso: 6 jul. 2022.
- Ferreira, T.R., Silva, B.B., Moura, M.S.B., Verhoef, A., Nóbrega, R.L.B., 2020. The use of remote sensing for reliable estimation of net radiation and its components: a case study contrasting land covers in the agricultural hotspot of the Brazilian semi-arid region. *Agricultural and Forest Meteorology* [online] 291. Disponível: 10.1016/j.agrformet.2020.108052. Acesso: 12 jul. 2022.
- Fröhlich, C., Mettenleiter, M., 2004. Terrestrial laser scanning – New perspectives in 3D surveying. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36, 7-13.
- Galvêncio, J.D., Popescu, S.C., 2016. Measuring individual tree height and crown diameter for mangrove trees with airborne Lidar data. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science* 2, 431-443.
- Gao, L., Zhang, X., 2021. Above-Ground Biomass Estimation of Plantation with Complex Forest Stand Structure Using Multiple Features from Airborne Laser Scanning Point Cloud Data. *Forests* [online] 12. Disponível: 10.3390/f12121713. Acesso: 17 jul. 2022.
- Giongo, M., Koehler, H.S., Machado, S.A., Kirchner, F.F., Marchetti, M., 2010. LiDAR: Princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira* [online] 30. Disponível: 10.4336/2010.pfb.30.63.231. Acesso: 7 jul. 2022.
- Goerndt, M.E., Monleon, V.J., Temesgen, H., 2010. Relating forest attributes with area and tree-based light detection and ranging metrics for western Oregon. *Western Journal of Applied Forestry* [online] 25. Disponível: 10.1093/wjaf/25.3.105. Acesso: 14 jul. 2022.
- Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C., Nothdurft, A., 2019. Influence of scanner position and plot size on the accuracy of tree detection and diameter estimation using terrestrial laser scanning on forest inventory plots. *Remote Sensing* [online] 11. Disponível: 10.3390/rs11131602. Acesso: 12 jul. 2022.
- Gomes, V.P., 2017. Avaliação espacial de espécies vegetais em áreas de Caatinga com dados LiDAR. *Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco*. Recife, 2017.
- Gomes, L.F., Brites, R.S., Locks, C.J., Anjos, R.R., 2020. Estimativas das alterações na biomassa florestal utilizando LiDAR em área de manejo florestal sustentável na Amazônia Sul-Occidental. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ* [online] 43. Disponível: 10.11137/2020_3_260_268. Acesso: 7 jul. 2022.
- Guerra-Hernández, J., Pascual, A., 2021. Using GEDI lidar data and airborne laser scanning to assess height growth dynamics in fast-growing species: a showcase in Spain. *Forest Ecosystems* [online] 8. Disponível:

- /10.1186/s40663-021-00291-2. Acesso: 20 jul. 2022.
- Gupta, R., Sharma, K., 2022. Mixed tropical forests canopy height mapping from spaceborne LiDAR GEDI and multisensor imagery using machine learning models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* [online] 27. Disponível: 10.1016/j.rsase.2022.100817. Acesso: 21 jul. 2022.
- Hall, F.G., Bergen, K., Blair, J.B., Dubayah, R., Houghton, R., Hurtt, G., Kelndorfer, J., Lefsky, M., Ranson, J., Saatchi, S., Shugart, H.H., Wickland, D., 2011. Characterizing 3D vegetation structure from space: mission requirements. *Remote Sensing of Environment* [online] 115. Disponível: 10.1016/j.rse.2011.01.024. Acesso: 20 jul. 2022.
- Hamraz, H., Contreras, M.A., Zhang, J., 2016. A robust approach for tree segmentation in deciduous forests using small-footprint airborne LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online] 52. Disponível: 10.1016/j.jag.2016.07.006. Acesso: 16 jul. 2022.
- Hancock, S., Armston, J., Hofton, M., Sun, X., Tang, H., Duncanson, L. I., Kellner, J.R., Dubayah, R., 2019. The GEDI simulator: A large-footprint waveform lidar simulator for calibration and validation of spaceborne missions. *Earth and Space Science* [online] 6. Disponível: 10.1029/2018EA000506. Acesso: 20 jul. 2022.
- Hansen, E.H., Gobakken, T., Næsset, E., 2015. Effects of pulse density on digital terrain models and canopy metrics using airborne laser scanning in a tropical rainforest. *Remote Sensing* [online] 7. Disponível: 10.3390/rs70708453. Acesso: 18 jul. 2022.
- Heinzel, J., Huber, M.O., 2017. Detecting tree stems from volumetric TLS data in forest environments with rich understory. *Remote Sensing* [online] 9. Disponível: 10.3390/rs9010009. Acesso: 12 jul. 2022.
- Hernández-Stefanoni, J.L., Castillo-Santiago, M.A., Mas, J.F., Wheeler, C.E., Andres-Maurício, J., Tun-Dzul, F., George-Chacón, S.P., Reyes-Palomeque, G., Castellanos-Basto, B., Vaca, R., Dupuy, J.M., 2020. Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon Balance Manage* [online] 15. Disponível: 10.1186/s13021-020-00151-6. Acesso: 17 jul. 2022.
- Ioki, K., Imanishi, J., Sasaki, T., Morimoto, Y., Kitada, K., 2010. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landscape and Ecological Engineering* [online] 6. Disponível: 10.1007/s11355-009-0077-4. Acesso: 8 jul. 2022.
- Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Lin, Y., 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry* [online] 65. Disponível: 10.1016/j.isprsjprs.2010.08.002. Acesso: 12 jul. 2022.
- Jamru, L.R., 2018. Correction pit free canopy height model derived from LiDAR data for the broad leaf tropical forest. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online] 169. Disponível: 10.1088/1755-1315/169/1/012113. Acesso: 15 jul. 2022.
- Jung, S., Kwak, D., Park, T., Lee, W., Yoo, S., 2011. Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners. *Remote Sensing* [online] 3. Disponível: 10.3390/rs3112346. Acesso: 16 jul. 2022.
- Kankare, V., Liang, X., Vastaranta, M., Yu, X., Holopainen, M., Hyypä, J., 2015. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online] 108. Disponível: 10.1016/j.isprsjprs.2015.07.007. Acesso: 11 jul. 2022.
- Kwak, D., Lee, W., Lee, J., Biging, G.S., Gong, P., 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. *Journal of Forest Research* [online] 12. Disponível: 10.1007/s10310-007-0041-9. Acesso: 15 jul. 2022.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J., 2002. LiDAR remote sensing for ecosystem studies. *BioScience* [online] 32. Disponível: 10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2. Acesso: 8 jul. 2022.
- Lefsky, M.A., Harding, D.J., Keller, M., Cohen, W.B., Carabajal, C.C., Espírito-Santo, F.D., de Camargo, P.B., 2006. Correction to “estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat”. *Geophysical Research Letters* [online] 32. Disponível: 10.1029/2005GL025518.607–622. Acesso: 18 jul. 2022.

- Leite, R.V., Silva, C.A., Broadbent, E.N., Amaral, C.H., Liesenberg, V., Almeida, D.R.A., Mohan, M., Godinho, S., Cardil, A., Hamamura, C., Faria, B.L., Brancalion, P.H.S., Hirsch, A., Marcatti, G.E., Dalla Corte, A.P., Zambrano, A.M.A., Costa, M.B.T., Matricardi, E.A.T., Silva, A.L., Goya, L.R.R.Y., Valbuena, R., Mendonça, B.A.F., Silva Júnior, C.H.L., Aragão, L.E.O.C., García, M., Liang, J., Merrick, T., Hudak, A.T., Xiao, J., Hancock, S., Duncanson, L., Ferreira, M.P., Valle, D., Saatchi, S., Klauber, C., 2022. Large scale multi-layer fuel load characterization in tropical savanna using GEDI spaceborne lidar data. *Remote Sensing of Environment* [online] 268. Disponível: 10.1016/j.rse.2021.112764. Acesso: 20 jul. 2022.
- Levick, S.R., Whiteside, T., Loewensteiner, D.A., Rudge, M., Bartolo, R. 2021. Leveraging TLS as a calibration and validation tool for MLS and ULS mapping of savanna structure and biomass at landscape-scales. *Remote Sensing* [online] 13. Disponível: 10.3390/rs13020257. Acesso: 1 jul. 2022.
- Liang, X., , Litkey, P., Hyypä, J., Kaatinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., 2012. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing* [online] 50. Disponível: 10.1109/TGRS.2011.2161613. Acesso: 12 jul. 2022.
- Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyypä, J., Holopainen, M., 2014. Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing* [online] 52. Disponível: 10.1109/TGRS.2013.2253783. Acesso: 12 jul. 2022.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaatinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., Vastaranta, M., 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online] 115. Disponível: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006. Acesso: 10 jul. 2022.
- Liang, X., Wang, Y., Pyörälä, J., Lehtomäki, M., Yu, X., Kaatinen, H., Kukko, A., Honkavaara, E., Issaoui, A.E., Nevalainen, O., 2019. Forest in situ observations using unmanned aerial vehicle as an alternative of terrestrial measurements. *Forest Ecosystems* [online] 6. Disponível: 10.1186/s40663-019-0173-3. Acesso: 12 jul. 2022.
- Lichti, D.D., Harvey, B.R., 2002. The effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements. In: *Symposium Geospatial Theory Processing and Applications*, 4., 2002, Ottawa: ISPRS, 9-12.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., Flood, M., 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* [online] 27. Disponível: 10.1191/0309133303pp360ra
- Lingnau, C., Silva, M.N., Santos, D.S., Machado, A., Lima, J.G.S., 2008. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. *Ambiência* 4, 85-96.
- Liu, X., Su, Y., Hu, T., Yang, Q., Liu, B., Deng, Y., Tang, H., Tang, Z., Fang, J., Guo, Q., 2022. Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, [online] 269. Disponível: 10.1016/j.rse.2021.112844. Acesso: 21 jul. 2022.
- Locks, C.J., Matricardi, E.A.T., 2019. Estimativa de impactos da extração seletiva de madeiras na Amazônia utilizando dados LiDAR. *Ciência Florestal* [online] 29. Disponível: 10.5902/1980509826007. Acesso: 7 jul. 2022.
- Lu, J., Wang, H., Qin, S., Cao, L., Pu, R., Li, G., Sun, J., 2020. Estimation of aboveground biomass of Robinia pseudoacacia forest in the Yellow River Delta based on UAV and backpack LiDAR point clouds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online] 86. Disponível: 10.1016/j.jag.2019.102014. Acesso: 13 jul. 2022.
- Maas, H.G., Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing* [online]. Disponível: 10.1080/01431160701736406. Acesso: 12 jul. 2022.
- Macedo, R.C., Santos, J.R., Soares, J.V., 2013. Treex (Tree Extractor) – Uma ferramenta para análise de dossel florestal e contagem de árvores a partir de dados LiDAR. *Revista Brasileira de Cartografia* 65, 673-680.
- Marselis, S. M., Tang, H., Armston, J. D., Calders, K., Labriere, N., Dubayah, R., 2018. Distinguishing vegetation types with airborne waveform lidar data in a tropical forest-savanna

- mosaic: A case study in Lope National Park, Gabon. *Remote Sensing of Environment* [online] 216. Disponível: 10.1016/j.rse.2018.07.023. Acesso: 21 jul. 2022.
- Marselis, S.M., Keil, P., Chase, J.M., Dubayah, R. 2022. The use of GEDI canopy structure for explaining variation in tree species richness in natural forests. *Environmental Research Letters* [online] 17. Disponível: 10.1088/1748-9326/ac583f. Acesso: 21 jul. 2022.
- Martins, M.T., Maragon, G.P., Costa, E.A., Pfeifer, M.I., Lisboa, G.S., 2020. Relação hipsométrica de três espécies da Caatinga, semiárido pernambucano. *Agrarian Academy* 7, 45-55.
- Medeiros, R., Andrade, J., Ramos, D., Moura, M., Pérez-Marin, A.M., Santos, C.A.C., Silva, B.B., Cunha, J., 2022. Remote sensing phenology of the Brazilian Caatinga and its environmental drivers. *Remote Sensing* [online] 14. Disponível: 10.3390/rs14112637. Acesso: 11 jul. 2022.
- Millikan, P.H.K., Silva, C.A., Rodriguez, L.C.E., Oliveira, T.M., Carvalho, M.P.L.C., Carvalho, S.P.C., 2019. Automated individual tree detection in Amazon tropical forest from airborne laser scanning data. *Cerne* [online] 25. Disponível: 10.1590/01047760201925032630. Acesso: 16 jul. 2022.
- Miranda, R.Q., Nóbrega, R.L.B., Moura, M.S.B., Raghavan, S., Galvêncio, J.D., 2020. Realistic and simplified models of plant leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online] 85. Disponível: 10.1016/j.jag.2019.101992. Acesso: 10 jul. 2022.
- Moe, K.T., Owari, T., Furuya, N., Hiroshima, T., 2020. Comparing individual tree height information derived from field surveys, LiDAR and UAV-DAP for high-value timber species in Northern Japan. *Forests* [online] 11. Disponível: 10.3390/f11020223. Acesso: 15 jul. 2022.
- Morsdorf, F., Kückenbrink, D., Schneider, F., Abegg, M., Schaepman, M., 2018. Close-range laser scanning in forests: towards physically based semantics across scales. *Interface Focus* [online] 8. Disponível: 10.1098/rsfs.2017.0046. Acesso: 14 jul. 2022.
- Mulverhill, C., Coops, N.C., Hermosilla, T., White, J.C., Wulder, M.A., 2022. Evaluating ICESat-2 for monitoring modeling, and update of large area forest canopy height products. *Remote Sensing of Environment* [online] 271. Disponível: 10.1016/j.rse.2022.112919. Acesso: 19 jul. 2022.
- Murgoitio, J., Shrestha, R., Glenn, N., Spaete, L., 2014. Airborne LiDAR and terrestrial laser scanning derived vegetation obstruction factors for visibility models. *Transactions in GIS* [online] 14. Disponível: 10.1111/tgis.12022. Acesso: 9 jul. 2022.
- Næsset, E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* [online] 80. Disponível: 10.1016/S0034-4257(01)00290-5. Acesso: 14 jul. 2022.
- Næsset, E., 2004. Estimation of above and below ground biomass in boreal forest ecosystems. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36, 145-148.
- Narine, L.L., Popescu, S.C., Malambo, L., 2020. Using ICESat-2 to estimate and map forest aboveground biomass: A first example. *Remote Sensing* [online] 12. Disponível: 10.3390/rs12111824. Acesso: 19 jul. 2022.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration, s.d. ICESat-2. Washington D.C.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration, 2010. ICESat. Washington D.C.
- Nelson, R., Ranson, K.J., Sun, G., Kimes, D.S., Kharuk, V., Montesano, P., 2009. Estimating Siberian Timber Volume Using MODIS and ICESat/GLAS. *Remote Sensing of Environment* [online] 113. Disponível: 10.1016/j.rse.2008.11.010. Acesso: 18 jul. 2022.
- Neuenschwander, A.L., Magruder, L.A., 2019. Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look. *Remote Sensing* [online] 11. Disponível: 10.3390/rs11141721. Acesso: 19 jul. 2022.
- Neuenschwander, A., Guenther, E., White, J.C., Ducanson, L., Montesano, P., 2020. Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests. *Remote Sensing of Environment* [online] 251. Disponível: 10.1016/j.rse.2020.112110. Acesso: 19 jul. 2022.
- Nishiwaki, A. A. M., Moura, M. S. B., Galvêncio, J. D., Santos, C. V. B., Carvalho, H. F. S., 2021. Comparação de métodos de detecção de indivíduos vegetais da Caatinga a partir de

- dados LiDAR aerotransportado. *Journal Hyperspectral Remote Sensing* [online] 11. Disponível: 10.29150/jhrs.v11.5.p302-309. Acesso: 16 jul. 2022.
- Novotný, J., Navrátilová, B., Janoutová, R., Oulehle, F., Homolová, L., 2020. Influence of site-specific conditions on estimation of forest above ground biomass from airborne laser scanning. *Forests* [online] 11. Disponível: 10.3390/f11030268. Acesso: 17 jul. 2022.
- Oliveira, L.T., Carvalho, L.M.T., Ferreira, M.Z., Oliveira, T.C.A., Acerbi Junior, F.W., 2012. Application of LiDAR to forest inventory for tree count in stands of *Eucalyptus* sp. *Cerne* [online] 18. Disponível: 10.1590/S0104-77602012000200001. Acesso: 15 jul. 2022.
- Oliveira, L.T., Ferreira, M.Z., Carvalho, L.M.T., Ferraz Filho, A.C., Oliveira, T.C.A., Silveira, E.M.O., Acerbi Junior, F.W., 2014. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [online] 49. Disponível: 10.1590/S0100-204X2014000900005. Acesso: 17 jul. 2022.
- Oliveira, C.P., Ferreira, R.L.C., da Silva, J.A.A.; Lima, R.B.d.; Silva, E.A.; Silva, A.F.d.; Lucena, J.D.S.d.; dos Santos, N.A.T.; Lopes, I.J.C.; Pessoa, M.M.d.L.; Melo, C.L.S.S., 2021. Modeling and spatialization of biomass and carbon stock using LiDAR metrics in tropical dry forest, Brazil. *Forests* [online] 12. Disponível: 10.3390/f12040473. Acesso: 18 out. 2022.
- Olofsson, K., Holmgren, J., 2016. Single tree stem profile detection using terrestrial laser scanner data, flatness saliency features and curvature properties. *Forests* [online] 7. Disponível: 10.3390/f7090207. Acesso: 12 jul. 2022.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Slavík, M., 2022. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* [online] 112. Disponível: 10.1016/j.jag.2022.102917. Acesso: 5 jul. 2022.
- Peng, X., Zhao, A., Chen, Y., Chen, Q., Liu, H., 2021. Tree height measurements in degraded tropical forests based on uav-lidar data of different point cloud densities: A case study on *dacrydium pierrei* in China. *Forests* [online] 12. Disponível: 10.3390/f12030328. Acesso: 13 jul. 2022.
- Pettorelli, N., Laurence, W.F., O'brien, T.G., Wegmann, M., Nagendra, H., Turner, W., 2014. Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology* [online] 51. Disponível: 10.1111/1365-2664.12261. Acesso: 5 jul. 2022.
- Piazzetta, G.R., Trzaskos, B., Machado, A.M.L., 2017. Aplicação a laser scanner na análise de estabilidade em escavações subterrâneas: Mina Tabiporã, Campo Largo, PR. *Geologia USP, Série Científica* [online] 17. Disponível: 10.11606/issn.2316-9095.v17-266. Acesso: 07 jul. 2022.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.F., 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture* [online] 37. Disponível: 10.1016/S0168-1699(02)00121-7. Acesso: 15 jul. 2022.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.F., 2003. Measuring individual tree crown diameter with LiDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing* [online] 29. Disponível: 10.5589/m03-027. Acesso: 16 jul. 2022.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., 2004. Seeing the trees in the forest: Using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* [online] 70. Disponível: 10.14358/PERS.70.5.589. Acesso: 14 jul. 2022.
- Popescu, S.C., Zhou, T., Nelson, R., Neuenschwander, A., Sheridan, R., Narine, L., Walsh, K.M., 2018. Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment* [online] 208. Disponível: 10.1016/j.rse.2018.02.019. Acesso: 19 jul. 2022.
- Qi, S., Nie, S., Guan, Y., Zhang, D., Wang, C., Zhang, X., 2022. Forest emissions reduction assessment using airborne LiDAR for biomass estimation. *Resources, Conservation & Recycling* [online] 181. Disponível: 10.1016/j.resconrec.2022.106224. Acesso: 13 jul. 2022.
- Raumonen, P., Kaasalainen, M., Akerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M., Lewis, P., 2013. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sensing*

- [online] 5. Disponível: 10.3390/rs5020491. Acesso: 12 jul. 2022.
- Rex, F.E., Dalla Corte, A.P., Debastiani, A.B., Kazama, V.S., Sanquetta, C.R., 2018. Uso de dados LiDAR na estimativa de variáveis biofísicas na Amazônia, sob diferentes resoluções espaciais. *Nativa* [online] 6. Disponível: 10.31413/nativa.v6i0.6312. Acesso: 07 jul. 2022.
- Ribas, R.P., Elmiro, M.A.T., 2013. Individualização de árvores em ambiente florestal nativo utilizando métodos de segmentação em modelos digitais produzidos a partir da tecnologia LiDAR. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 65. Disponível: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43856>. Acesso: 05 jul. 2022.
- Rishmawi, K., Huang, C., Schleeweis, K., Zhan, X., 2022. Integration of VIIRS observations with GEDI-LiDAR measurements to monitor forest structure dynamics from 2013 to 2020 across the conterminous United States. *Remote Sensing* [online] 14. Disponível: 10.3390/rs14102320. Acesso: 22 jul. 2022.
- Salas, E. A. L., 2021. Waveform LiDAR concepts and applications for potential vegetation phenology monitoring and modeling: a comprehensive review. *Geo-spatial Information Science* [online] 24. Disponível: 10.1080/10095020.2020.1761763. Acesso: 18 jul. 2022.
- Schneider, F.D., Ferraz, A., Hancock, S., Duncanson, L.I., Dubayah, R.O., Pavlick, R.P., Schimel, D.S., 2020. Towards mapping the diversity of canopy structure from space with GEDI. *Environmental Research Letters* [online] 15. Disponível: 10.1088/1748-9326/ab9e99. Acesso: 21 jul. 2022.
- Sheng, Y., 2008. Quantifying the size of a LiDAR footprint: A set of generalized equations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* [online] 5. Disponível: 10.1109/LGRS.2008.916978. Acesso 7 jul. 2022.
- Silva, M.N., Buck, A.L.B., Lingnau, C., Machado, A.M.L., Martins Neto, R.P., Pesck, V. A., 2013. Laser scanner terrestre para medições florestais – Princípios e aplicações. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 65. Disponível: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43886/23150>. Acesso: 10 jul. 2022.
- Silva, A.G.P., Görgens, E.B., Campoe, O.C., Alvares, C.A., Stape, J.L., Rodriguez, L. C.E., 2015. Assessing biomass based on canopy height profiles using airborne laser scanning data in eucalypt plantation. *Scientia Agricola* [online] 72. Disponível: 10.1590/0103-9016-2015-0070. Acesso: 15 jul. 2022.
- Silva, C.A., Klauberg, C., Hudak, A.T., Vierling, L.A., Liesenberg, V., Carvalho, S.P. C., Rodriguez, L.C.E., 2016. A principal component approach for predicting the stem volume in Eucalyptus plantations in Brazil using airborne LiDAR data. *Forestry* [online] 89. Disponível: 10.1093/forestry/cpw016. Acesso: 15 jul. 2022.
- Silva, I.L.G., Silva, C.A., Klauberg, C., Mello, J.C., 2017. Detecção de árvores individuais em área florestal mista de coníferas por meio de dados LiDAR aerotransportado. *Advances in Forestry Science* [online] 4. Disponível: 10.34062/afs.v4i2.4067. Acesso: 5 jul. 2022.
- Silva, D.A.O., Lopes, P.M.O., Moura, G.B.A., Silva, E. F. F., Silva, J. L. B., Bezerra, A. C., 2019. Evolução espaço-temporal do risco de degradação da cobertura vegetal de Petrolina – PE. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 34. Disponível: 10.1590/0102-7786334018. Acesso: 18 jul. 2022.
- Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., Río-Barral, P., Perez-Collazo, C., Arias, P., Riveiro, B., 2019. Review of laser scanning technologies and their applications for road and railway infrastructure monitoring. *Infrastructures* [online] 4. Disponível: 10.3390/infrastructures4040058. Acesso: 9 jul. 2022.
- Stereńczak K., Będkowski K., Weinacker H. 2008. Accuracy of crown segmentation and estimation of selected trees and forest stand parameters in order to resolution of used DSM and nDSM models generated from dense small footprint LIDAR data. In: ISPRS Congress, Beijing, China, Commission VI, WG VI/5, 27–32.
- Stereńczak, K., Zasada, M., 2011. Accuracy of tree height estimation based on LiDAR data analysis. *Folia Forestalia Polonica* [online] 53. Disponível: 10.5281/zenodo.30859. Acesso: 15 jul. 2022.
- Sun, P., Wu, Y., Xiao, J., Hui, J., Hu, J., Zhao, F., Qiu, L., Liu, S., 2019. Remote sensing and modeling fusion for investigating the ecosystem water-carbon coupling processes. *Science of the Total Environment* [online] 697. Disponível:

- 10.1016/j.scitotenv.2019.134064. Acesso: 05 jul. 2022.
- Tang, H., Dubayah, R., Swatantran, A., Hofton, M., Sheldon, S., Clark, D.B., Blair, B., 2012. Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica. *Remote Sensing of Environment* [online] 124. Disponível: 10.1016/j.rse.2012.05.005. Acesso: 19 jul. 2022.
- Tan, L., Zheng, K., Zhao, Q., Wu, Y., 2021. Evapotranspiration estimation using remote sensing technology based on a SEBAL model in the upper reaches of the Huaihe river basin. *Atmosphere* [online] 12. Disponível: 10.3390/atmos12121599. Acesso: 11 jul. 2022.
- Teixeira, A.H. de C., Leivas, J.F., Hernandez, F.B.T., Franco, R.A.M., Nunez, D.N.C., 2016. Evapotranspiration, biomass production and water productivity acquired from Landsat 8 images in the northwestern side of the São Paulo state, Brazil. *Proceedings of SPIE* [online] 9998. Disponível: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/152628/1/PofSPIE-HERIBERTO-ET-BIO-SP.pdf>. Acesso: 11 jul. 2022.
- Wang, C., Glenn, N.F., 2008. A linear regression method for tree canopy height estimation using airborne lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing* [online] 34. Disponível: 10.5589/m08-043. Acesso: 18 jul. 2022.
- Waser, L. T., Baltsavias, E., Ecker, K., Eisenbeiss, H., Feldmeyer-Christe, E., Ginzler, C., Kuchler, M., Zhang, L., 2008. Assessing changes of forest area and shrub encroachment in a mire ecosystem using digital surface models and CIR aerial images. *Remote Sensing of Environment* [online] 112. Disponível: 10.1016/j.rse.2007.09.015. Acesso: 18 jul. 2022.
- Whyte, R., Streeter, L., Cree, M.J., Dorrington, A.A., 2015. Application of lidar techniques to time-of-flight range imaging. *Applied Optics* [online] 54. Disponível: 10.1364/AO.54.009654. Acesso: 9 jul. 2022.
- Wieser, M., Hollaus, M., Mandlbürger, G., Glira, P. and Pfeifer, N., 2016. ULS LiDAR supported analyses of laser beam penetration from different ALS systems into vegetation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences III-3*. Disponível: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/III-3/233/2016/isprs-annals-III-3-233-2016.pdf>. Acesso: 14 jul. 2022.
- WMO. World Meteorological Organization. 2021. *MOLI LiDAR*. Genebra.
- Wutke, J.D., Centeno, J.A.S., 2007. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres. *Boletim de Ciências Geodésicas* [online] 13. Disponível: <https://www.redalyc.org/pdf/3939/393937701009.pdf>. Acesso: 9 jul. 2022.
- Yrttimaa, T., Saarinen, N., Kankare, V., Liang, V., Liang, X., Hyypä, J., Holopainen, M., Vastaranta, M., 2019. Investigating the feasibility of multi-scan terrestrial laser scanning to characterize tree communities in Southern boreal forest. *Remote Sensing* [online] 11. Disponível: 10.3390/rs11121423. Acesso: 12 jul. 2022.
- Zandoná, D.F., Lingnau, C., Nakajima, N.Y. 2008. Varredura a laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. *Scientia Forestalis* 36, 295-306.
- Zasada, M., Sterenczak, K., Dudek, W.M., Rybski, A., 2013. Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques. *Forest Ecology and Management* [online] 302. Disponível: 10.1016/j.foreco.2013.03.041. Acesso: 12 jul. 2022.
- Zhang, Z., Cao, L., She, G., 2017. Estimating Forest Structural Parameters Using Canopy Metrics Derived from Airborne LiDAR Data in Subtropical Forests. *Remote Sensing* [online] 9. Disponível: 10.3390/rs9090940. Acesso: 18 jul. 2022.
- Zonete, M.F., Rodriguez, L.C.E., Packalén, P., 2010. Estimación de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no Sul: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. *Scientia Forestalis* 38, 225-235.