



CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA FLORESTAL EM REGENERAÇÃO NA MATA ATLÂNTICA POR LIDAR: ABORDAGEM DO MAPEAMENTO BIBLIOMÉTRICO

Marcelo Cardoso da Silva Bandoria ¹
Alfredo Pereira de Queiroz ²

RESUMO

As discussões em Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação destacam com ênfase os limites dos sistemas-sensores do tipo passivo para estudos ecológicos associados à estrutura florestal. Grande expectativa é alimentada sobre o recente lançamento (2019) dos dados abertos orbitais do tipo laser (LiDAR), pelo programa Global Ecosystem Dynamics Investigation GEDI, pois a maioria dos estudos produzidos até o momento são por aerolevantamento e, portanto, de elevado custo. A evolução da capacidade de detectar e caracterizar ambientes florestais degradados ou em regeneração em florestas tropicais em escala global e regional, pode apoiar estudos sobre o ambiente da Mata Atlântica no Brasil. Busca-se entender como as características estruturais de florestas em regeneração pode apoiar a compreensão sobre diferentes paisagens neste bioma e inúmeros estudos de manejo e conservação de ambientes tropicais. Este artigo tem por objetivo demonstrar os resultados da revisão sistemática da literatura internacional sobre o uso de dados LiDAR na detecção de medidas estruturais em florestas tropicais. A abordagem metodológica usada foi a elaboração e análise de mapas bibliométricos. Dos artigos da Web of Science, foram analisados: as citações dos autores, países de origem, organizações, revistas e os artigos mais lidos, em especial os de revisão sobre a temática. Os resultados mostraram que foi possível selecionar e reduzir a quantidade de leitura sem perder a qualidade: a amostra inicial de 415 foi reduzida para de 115 artigos, com alto potencial de contribuição para a revisão bibliográfica.

Palavras-chave: Caracterização estrutural, Mata Atlântica, LiDAR, Revisão sistemática.

ABSTRACT

Discussions in Remote Sensing in the study of vegetation highlight with emphasis the limits of passive-type sensor systems for ecological studies associated with forest structure. The great expectation is fed on the recent launch (2019) of open laser-type orbital data (LiDAR), by the Global Ecosystem Dynamics Investigation GEDI program, since most studies produced so far are by aerial surveying and, therefore, high cost. The evolution of the capacity to detect and characterize degraded or regenerating forest environments in tropical forests on a global and regional scale can support studies on the Atlantic Forest environment in Brazil. We seek to understand how the structural characteristics of regenerating forests can support the understanding of different landscapes in this biome and numerous studies on the management and conservation of tropical environments. This paper aims to demonstrate the results of a systematic review of the international literature on the use of LiDAR data to detect structural measures in tropical forests. The methodological approach used was bibliometric mapping and analysis. From the Web of Science articles, the following were analyzed: authors' citations, countries of origin, organizations, journals, and the most read articles, especially the review articles on the theme. The results showed that it was possible to select and reduce the amount of reading without losing

¹ Doutorando pelo Programa de Pós Graduação em Geografia Física (PPGF) da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH) da Universidade de São Paulo (USP), marcelo.bandoria@usp.br;

² Professor Doutor do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo (USP), aqueiroz@usp.br.



quality: the initial sample of 415 was reduced to 115 articles, with high potential to contribute to the literature review.

Keywords: Structural characterization, Atlantic Forest, LiDAR, Systematic review.

INTRODUÇÃO

Diferentes acordos e programas estratégicos entre as nações buscam gerar práticas de monitoramento a florestas tropicais visando sua proteção e recuperação. Muitos programas têm sido firmados por meio de Contribuições Nacionalmente Determinadas (Intended Nationally Determined Contributions, INDCs), dentro da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), seja estimulando reduzir as emissões de gases de efeito estufa, ou buscando a redução e controle sobre os impactos associados à perda de florestas, ou por meio de dados orbitais em diferentes escalas, sobretudo na América Latina (DA PONTE et al., 2015).

Estimativas obtidas por Sensoriamento Remoto da Mata Atlântica sugerem que cerca de 11,4% a 28% de sua cobertura vegetal original permanece intacta (REZENDE et al., 2018; RIBEIRO et al., 2009). Na escala local, a floresta influencia o microclima e a formação das chuvas (SPRACKLEN et al, 2015). Em escala global, a floresta influencia o clima, principalmente por meio da retenção de estoques de carbono (ARAGÃO et al., 2014), além de contribuir para a remoção de carbono em áreas onde ocorre o crescimento de floresta secundária. Cerca de 55% dos estoques totais de carbono da floresta são armazenados em biomassa viva, em decomposição de restos de plantas, lixo e solo nos trópicos (PAN et al., 2011).

Estudos sobre o processo de sucessão da regeneração florestal destacam sua importância, seja para observar o seu impacto no estoque de carbono, seja para entender seus impactos na recuperação de serviços ecossistêmicos. Para tanto, têm aumentado o desenvolvimento de inúmeras técnicas de medição em diferentes tipos de paisagens, tanto em campo, quanto por alternativas remotas em diferentes escalas de entendimento do fenômeno (CHAZDON et al., 2016; HEINRICH et al., 2021). Assim, no contexto das mudanças climáticas e de crise na gestão de recursos ambientais, torna-se desafiador utilizar-se de meios que possam reduzir custos para o levantamento de informações sobre a degradação de florestas.



O monitoramento orbital tem sido amplamente usado para estimar por diferentes produtos de Sensoriamento Remoto (SR) diversas variáveis ambientais associadas aos ambientes florestais, que na maioria das vezes, precisam se apoiar em validações feitas por meio de inventários de campo. Entretanto, como estas validações têm altos custos associados, busca-se desenvolver produtos de monitoramento florestal com maiores possibilidades de detecção sobre diferentes aspectos e que possam substituir ou reduzir a validação por inventário de campo (ZHU et al., 2020).

Parte da discussão sobre estudos de vegetação por SR tem destacado a busca por dados orbitais com precisão que possam estimar indiretamente variáveis que quantificam diversos aspectos de florestas, sobretudo aqueles associados à sua estrutura. Medições indiretas de carbono por meio do levantamento da Biomassa Acima do Solo (BAS), destacam-se pela alta quantidade de publicações, majoritariamente caracterizados por índices de vegetação. Entretanto, novas possibilidades tecnológicas surgem de programas e sistemas sensores que permitem aprimorar os estudos sobre a estrutura da floresta. Possuem potencial para apoiar inúmeros estudos, como reduzir custos e dar suporte na formulação de inventários florestais (ABBAS et al., 2020). Portanto, obter por SR a caracterização de aspectos estruturais de florestas em regeneração, que tem sido um desafio devido tais limitações técnicas de diversas escalas, podem num futuro próximo avançar, pois a necessidade de dar suporte ao monitoramento e o entendimento destes fenômenos associados a degradação de florestas tropicais tem aumentado no Mundo, sobretudo em países em desenvolvimento (JACKSON; ADAM, 2020).

Os limites técnicos e metodológicos do SR no estudo da vegetação estão ligados ao avanço de novos sistemas sensores. A escala espacial dos dados do tipo laser em resolução de 25 m se apresenta como avanço nesta área do conhecimento. O sistema-sensor Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI), lançado em 2018 e com a disponibilidade dos primeiros dados processados a partir do final de 2019, têm possibilitado detectar informações acerca da estrutura florestal. A importância da caracterização de estruturas de florestas em processo de regeneração no bioma da Mata Atlântica, sobretudo através do uso de novos dados de sistemas sensores ativos, abre um grande caminho para a formulação de novos conhecimentos aplicados à ecologia e geografia. A importância desta temática está associada a diversos fatores, sobretudo devido à baixa produtividade internacional de estudos sobre o bioma da Mata Atlântica, e, portanto, de florestas tropicais no Brasil (NGUYEN et al., 2020).



As informações sobre a estrutura florestal detectadas por SR de laser estão associadas aos aspectos que expressam a degradação, e podem ser ligadas a indicadores do tipo: a) estrutura da cobertura do dossel como as diferentes aberturas de um dossel em áreas de cortes, b) fragmentação das paisagens (número de manchas, área e perímetro), c) densidade florestal, sua variação de conectividade; d) biomassa acima do solo e seu estoque de carbono, d) altura do dossel, dentre inúmeras variáveis que podem ser obtidas por diferentes métodos e diversos produtos de LiDAR de forma direta e indireta (DUPUIS et al., 2020; VAGLIO LAURIN et al., 2014).

O avanço de novas técnicas possui, portanto, grande potencial em impactar o setor econômico, sobretudo no setor florestal ainda de forma desconhecida, como por exemplo, reduzindo custos efetivos em levantamentos de campo que são feitos para caracterizar a estrutura florestal, possibilitando criar inventários em paisagens manejadas pela exploração econômica do setor, além de possibilitar inúmeros estudos ambientais que dependem de informações sobre a variação estrutural, sobretudo de áreas em recuperação. Este artigo tem por objetivo mostrar o método de revisão sistemático utilizando-se como base a revisão bibliométrica visando a construção da revisão bibliográfica do desenvolvimento de tese, esta que tem por objetivo científico buscar responder seguintes perguntas:

1. Existem diferenças na estrutura de florestas secundárias em diferentes estágios de recuperação?
2. Quanto tempo demora até que a estrutura das florestas secundárias seja indistinguível de uma floresta primária?
3. Quais variáveis afetam o processo de recuperação de florestas secundárias?

METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi baseada na elaboração de mapeamento bibliométrico (COBO et al., 2011; VAN ECK et al., 2010), que busca expressar diferentes tipos de métricas sobre relações entre as referências bibliográficas. Este é um produto quantitativo da análise de dados obtidos da produção de literatura científica internacional publicada em diversas revistas especializadas e armazenadas na base de dados da Web of Science (WoS).



O caminho realizado neste estudo foi dividido em quatro etapas. A primeira foi denominada de fase de IDENTIFICAÇÃO da produção científica disponível. Para tanto, foi feita uma pesquisa por meio da utilização de palavras chaves simples e compostas sobre o assunto investigado. Esse procedimento foi feito na base de dados WoS e considerou diferentes combinações e conexões lógicas de agrupamento testados.

Na segunda etapa, denominada de fase de TRIAGEM, foram inseridos filtros para especificar e refinar a pesquisa. Neste caso foram selecionados os artigos de revisão e escolhidos as principais áreas do conhecimento relacionadas ao estudo e área de pesquisa que foram: Sensoriamento Remoto (SR), Geografia Física, Geografia e Florestal. Com essa estratégia a amostra de referências reduziu para aproximadamente 300 estudos potenciais para o processo de revisão bibliográfica.

Os resultados obtidos da base de dados foram exportados em arquivo .txt e analisados no software VOSviewer, usado para as análises de mapeamento bibliométrico, e esta terceira etapa foi denominada de ELEGIBILIDADE.

Os mapas bibliométricos foram elaborados buscando destacar os estudos mais citados, além da autoria, país de origem, instituição responsável e principais revistas que publicaram. Os critérios utilizados para esta elaboração foram os seguintes: a análise foi feita pelo critério de citação e suas respectivas unidades (autor, país, instituição e fonte). Considerou-se o mínimo de 4 documentos por autor e no mínimo 25 citações pelo mesmo. Essa lógica foi repetida para o agrupamento de países, instituições e fontes.

Os artigos selecionados com prioridade para leitura e análise foram, primeiramente os de revisão (18), seguidos pelos artigos comuns que foram citados no mínimo 15 vezes na base de dados, o que possibilitou reduzir o n amostral de 303 para 136 artigos. Com o resultado destas etapas foram primeiramente selecionados os artigos de revisão seguidos pelos primeiros 19 artigos internacionais mais citados para realizar a primeira etapa da revisão bibliográfica da tese em andamento, sendo que alguns deles são apresentados neste estudo.

A leitura dos artigos seguiu a seguinte lógica: primeiramente verificou-se a distribuição no texto das palavras chaves mais importantes, seguida da leitura dos resumos. Em suma foi feita uma busca de informações ligadas a proposta de tese, que objetiva entender quais avanços são necessários ao uso de sistemas sensores LiDAR ligado a análise da estrutura da vegetação em florestas tropicais. Quando eram dominantes a presença de palavras chave associadas a este objetivo, então as principais partes dos

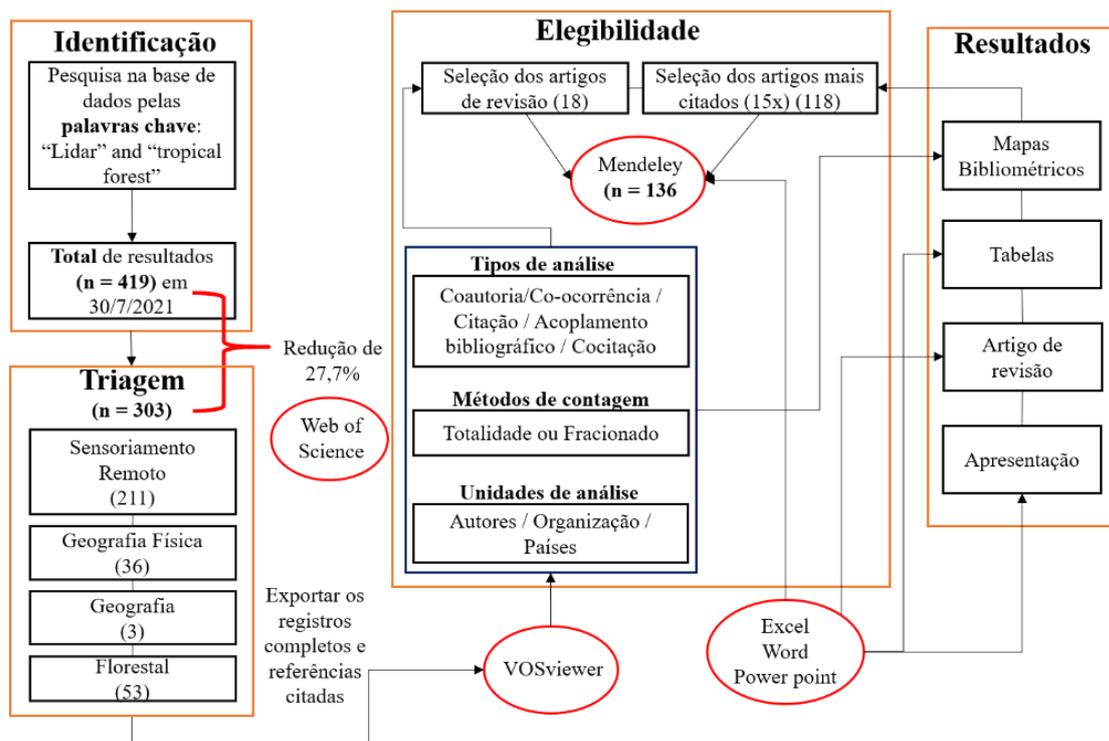


artigos eram lidos, na sequência: resumo, introdução, metodologia, resultados e discussões.

Estas leituras foram realizadas utilizando-se o software Mendeley, que é um gerenciador de referências que associado ao Word, possibilitaram agilizar a leitura e a produção deste artigo, além da elaboração de apresentações, extração e análise dos dados em tabelas, por meio do Power point e Excell, ambos do Pacote Office.

A última etapa do processo foi denominada de RESULTADOS e buscou demonstrar os produtos obtidos desta metodologia de revisão sistemática. O resumo deste processo pode ser visualizado no organograma da Figura 1.

Figura 1: Organograma com a sequência metodológica utilizada para a revisão sistemática de artigos.



Fonte: Autores (2021).

Para este estudo, utilizou-se a combinação de palavras chave: "Lidar" and "tropical forest". Em 30 de junho de 2021, a amostra bibliográfica obtida na WoS Core Collection foi de 419 artigos. Para elaboração dos mapas bibliométricos foi utilizado o software VOSviewer versão 1.6.16.



REFERENCIAL TEÓRICO

O estado da arte sobre o uso de dados produzidos por Sistema de Varredura a Laser, em inglês denominado de Light Detection And Ranging (LiDAR) em Sensoriamento Remoto (SR) ativo, tem sido discutido em diversos artigos de revisão, na maioria destacando sua aplicação ao monitoramento florestal por meio de questões associadas à estrutura vegetativa (GIONGO et al., 2010).

Entende-se esse tipo de tecnologia LiDAR como um tipo de SR ativo que emite um feixe de laser em direção a superfície. O sinal de retorno permite estimar as informações a respeito dos alvos da superfície e, no caso da vegetação, possibilita estimar a estrutura de uma floresta (JENSEN, 2014; LEFSKY et al., 2002; SILVA et al., 2020; SILVA JUNIOR, 2018; WEHR; LOHR, 1999).

Na trajetória de estudos sobre o SR aplicado à vegetação destaca-se o importante papel dos dados da série Landsat (Land Remote Sensing Satellite) com inúmeros estudos que foram feitos para demonstrar a grande contribuição de uso dos dados da série. No âmbito da investigação florestal tem sido discutido, recentemente, a evolução, ajustes e correções sobre tais dados, sobretudo associados à detecção da mudança da vegetação na superfície terrestre. Como, por exemplo, as investigações ligadas à extração seletiva de madeira em florestas tropicais, ou mesmo, ao desafio de quantificar a biomassa em áreas onde não existem dados de campo disponíveis para validação (ABBAS et al., 2020; DUBE; MUTANGA, 2015; NGUYEN et al., 2020). Diversos estudos de caso exemplificam as técnicas de SR aplicadas ao levantamento de informações biofísicas em florestas tropicais, sobretudo associando a questão estrutural da vegetação ao ciclo do carbono sobre diferentes escalas (BROWN; LUGO, 2017; KUMAR et al., 2015; MOHD ZAKI; ABD LATIF, 2017; NGUYEN et al., 2020).

A biomassa acima do solo de florestas tem sido estimada em média escala a partir de dados estruturais de florestas, predominantemente por meio da associação entre dados de sensores passivos, como é o caso do Landsat 7 e 8 (ETM+, OLI), a dados de radar, e, quando possível, são validados por meio de dados obtidos por inventário de campo, seja por meio de modelagens clássicas de regressão linear múltipla ou por Random Forest (WINGATE et al., 2018; ZHENG et al., 2004; ZHU et al., 2020).

Diversas informações ligadas à estrutura da vegetação têm sido geradas a partir de dados LiDAR, sobretudo associadas a variáveis dendrométricas. Estas medidas são



relacionadas aos parâmetros florestais, seja por medidas diretas, tais como a altura do dossel e/ou árvores individuais, volume e diâmetro da copa, número de indivíduos, ou indiretamente por modelagem, tais como o volume, biomassa, carbono, área basal, diâmetro à altura do peito, cobertura da copa, e identificação de espécies, em sua maioria ligadas à parâmetros de altura das árvores (D'OLIVEIRA; FIGUEIREDO; PAPA, 2014; GIONGO et al., 2010; ZANDONÁ; LINGNAU; NAKAJIMA, 2008).

Dupuis e colaboradores (2020) destacam, em estudo de revisão, a obtenção de variáveis estruturais de florestas, que apoiam o entendimento sobre indicadores de ajuste de resiliência em cortes seletivos em florestas tropicais úmidas. O estudo ainda mostra um amplo aspecto de definições ligadas ao termo degradação, mas podemos dizer que, segundo Ghazoul e colaboradores (2015), uma floresta degradada pode ser definida como "um estado de sucessão interrompida induzida antropogenicamente, onde os processos ecológicos que fundamentam a dinâmica da floresta são diminuídos ou severamente restringidos". Destaca-se que o SR possibilita quantificar variáveis indicadoras espacializadas, sobretudo em áreas fragmentadas e aberturas de clareiras, e especificamente por dados LiDAR, é possível obter diferentes indicadores de mudanças na altura e biomassa do dossel, a presença de florestas secundárias, as lacunas no dossel, cortes e mudanças abruptas de altura, bem como detectar a presença de cortes de estradas com precisão, frequentemente associados à degradação florestal. Sugere-se neste estudo o uso integrado de imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), que em conjunto expressam o grande potencial a ser explorado no universo de investigação sobre a estrutura de florestas, que apoiam o mapeamento de tais fenômenos e explicam melhor a degradação florestal.

Jackson e colaboradores (2020) destacam um panorama geral sobre o estado, importância, inovações e o aumento de técnicas e métodos ligados à manipulação de dados obtidos por SR que são aplicados a muitos estudos sobre cortes seletivos de madeira em florestas tropicais. Este estudo de revisão fez um levantamento nas bases da Science Direct, Web of Science e Scopus e utilizou-se de um método sistemático para selecionar, dentre um universo de mais de 5 mil artigos, cerca de 110 mais relevantes. A distribuição dos autores por continente foi de: 32% Europa, 14,5% Ásia, 28% América do Norte e 25,5% América do Sul. Destaca-se a alta produção de pesquisas com líderes oriundos do Brasil e Estados Unidos sobre o tema, igualmente em 25. A revisão mostra que a maior parte dos estudos em florestas tropicais são feitos na América do Sul 58,7%, seguidos de



24,8% na Ásia e 16,5% na África. A maioria dos estudos utilizou-se de sensores de resolução espacial média (52,2%), seguidos de sensores de resolução muito alta (28%), sensores de alta resolução (18%) e resolução grosseira (1,8%) e todos foram abordagens em escala regional. Foram usados 28 tipos de sensores, dentre os tipos, Ópticos, Radar e LiDAR. A maioria foi feito com o primeiro tipo, destacando-se a série Landsat, com mais de 60 estudos analisados, e o aumento em recentes estudos do uso do Sentinel-2, MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) e ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) e quanto aos sistemas-sensores do tipo Radar destaca-se o uso dos ALOS PALSAR e TerraSAR-X. A maioria destes estudos utilizaram-se de estimativas indiretas por meio de índices de vegetação, sobretudo o índice NDFI (Normalized Difference Fraction Index) quando comparado aos clássicos NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NBR (Normalized Burn Ratio). Os principais métodos utilizados foram de interpretação visual, classificação supervisionada, associação com dados de campo, análise sobre a mistura espectral dos pixels, técnicas semi-automáticas de obtenção de dados tem sido utilizada de forma associada aos ajustes estatísticos. Os principais métodos de validação na sua maioria (51%) foram obtidos por dados de campo, seguidos de 26% por SR, 15% por ambos e 8% por simulações. A revisão mostra que poucos estudos haviam sido feitos utilizando dados LiDAR devido a baixa disponibilidade e o alto custo de geração. Entretanto, quando se refere a esta técnica afirma-se que ela é a única capaz de estimar e mapear com precisão o corte seletivo, mas ainda havia poucas publicações sobre o assunto, e por isso, muitos usos mistos de sistemas sensores são normalmente empregados. Por fim, destaca-se que a integração entre dados LiDAR e dados de campo poderia reduzir significativamente os custos associados ao levantamento de dados estruturais em campo.

Dittmann e colaboradores (2017) destacam, em estudo de revisão, a avaliação da acurácia e eficiência de diferentes métodos não invasivos/destrutivos que são utilizados para quantificar a Biomassa Acima do Solo (BAS). Destaca-se o uso do LiDAR em diversos níveis de aquisição e a possibilidade de aprimorar a estimativa de BAS. Em nível de superfície são usados scanners LiDAR de mão para estimar a BAS em árvores individualmente de modo não-destrutivo. No nível de aquisição por sensores acoplados em aeronaves, estudos utilizando-se de LiDAR estimam indiretamente a BAS por meio de equações alométricas. Outros estudos utilizam-se de levantamentos realizados por VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) utilizando-se de sistemas sensores LiDAR para



gerar estimativas e parâmetros florestais, não para estimar BAS, devido à limitação de integração de um sistema GPS que gere uma localização precisa dos pontos levantados pelo VANT, mas para possibilitar com maior aptidão e precisão a altura de árvores, se comparados aos dados obtidos por aeronaves.

Nagendra e colaboradores (2013) verificaram a fragilidade do entorno de áreas protegidas locais e regionais por meio de diferentes dados de SR, destacando a grande sinergia entre dados LiDAR para com outros sensores em detectar mudanças na estrutura tridimensional de habitats, devido a estimativa da altura e BAS que podem ser associadas a diferentes idades, estágios sucessionais, identificação e composição de espécies, e portanto, das condições da floresta e seus regimes de perturbação, com isso possibilitando aprimorar o gerenciamento do entorno e das próprias áreas protegidas.

Morton e colaboradores (2014) evidenciaram de forma comparativa e quantitativa o grau de imprecisão sobre dados de reflectância bidirecionais de dosséis oriundos de dados de sensores ópticos. O objetivo do estudo foi contribuir para o debate sobre a questão: a produtividade da floresta tropical é mais limitada pela luz solar ou pela chuva? O fato é que ocorre o aumento da taxa de esverdeamento, ou simplesmente de verde, obtida por meio de respostas do infravermelho próximo de imagens de SR, em períodos de seca, quando a radiação solar diminui, fenômeno conhecido como “green up”. Os impactos sobre a Produção Primária Líquida são discutidos em ampla literatura. Neste estudo foi feita uma comparação entre dados corrigidos, sobretudo pelos artefatos relacionados a geometria de iluminação e visada dos sensores, buscando verificar como os mesmos afetam os valores estimados por meio de índices de vegetação em estudos sobre dosséis florestais. Comparativamente utilizou-se de dados LiDAR do sistema sensor Geosciences Laser Altimeter System (GLAS-ICESat), e dados de EVI e NDVI do Aqua MODIS, para verificar a origem desse aumento de verde. Os resultados mostram que a combinação entre dados independentes, modelagem teórica e observações ópticas de SR apoiou o entendimento e avanço na discussão da temática, possibilitando a geração de várias linhas de evidências que apoiam a caracterização deste fenômeno, ainda não explicado totalmente.

Asner e colaboradores (2012a, 2014) destacaram estudos sobre os ajustes necessários no processo de calibração de dados obtidos por LiDAR aplicados na avaliação de estoques de carbono em florestas tropicais, e levantamentos de inventários terrestres. Esses ajustes impactam o uso desta tecnologia em escalas regional e global. A



incorporação de informações ecológicas alométricas de altura do diâmetro e densidade de madeira em nível de plantio, impactaria significativamente, segundo os autores, em levantamentos aerotransportados de inventários florestais terrestres, reduzindo tempo e custos no processo de calibragem e apoiando a produção de mapas de carbono de alta resolução, estudos de conservação de florestas tropicais e mitigação do clima. Esse processo de calibração é tradicionalmente realizado por meio de dados de parcelas de inventários florestais terrestres, obtidos por medidas exaustivas de diâmetro e alturas de árvores e identificações de espécies. Este estudo desenvolve uma modelagem que reduz a quantidade de dados de entrada, e, portanto, facilita esse processo de calibragem do LiDAR aerotransportado na estimativa de densidade de carbono na superfície. Quatro regiões tropicais foram usadas para este experimento na estimativa de carbono acima do solo sobre parcelas de inventário de campo usando um único modelo LiDAR e os resultados foram satisfatórios ($R^2 = 0,80$). Desta forma os resultados apontam que existe ainda uma limitação de equalização entre as métricas utilizadas entre dados em campo e de LiDAR, e conhecer tais limitações em escala regional e global, apoiaria ajustar o uso desta ferramenta de forma mais precisa. Portanto, este processo exige ainda muitos outros estudos para ajustar medidas estruturais de florestas tropicais em estudos de carbono, quando se pretende generalizar as estimativas de carbono no cômputo total do estoque em florestas tropicais.

Asner e colaboradores (2012b) apresentam os estudos obtidos pela segunda geração do Carnegie Airborne Observatory (CAO-2) e produtos do mapeamento do Airborne Taxonomic Mapping Systems (AToMS) que produz a fusão de dados de três tipos de sensores, um ativo do tipo LiDAR (1064 nm), e dois outros sensores passivos espectrômetros com respostas no intervalo do visível até o infravermelho de ondas curtas, um de (365 a 1052 nm) e outro de (380 a 2510 nm), ambos em alta resolução espacial. Estes dados são usados para o entendimento da fusão de diferentes dados de SR, do tipo passivo e ativo, em meso-escala, relacionados a estudos sobre a composição estrutural, funcional e orgânica dos ecossistemas da Terra. A busca por demonstrar quantitativamente a fusão desses dados e sua precisão apoia produções de informações ecológicas derivadas de SR. Comparou-se cenas contrastantes de dois ambientes, um construído na Universidade de Stanford e outra de uma floresta tropical de planície amazônica. A análise foi feita utilizando-se de técnicas de processamento e de componentes principais e demonstrou-se quantitativamente que a fusão de dados de precisão aumenta muito a



dimensionalidade das informações ecológicas derivadas de SR, mas que existem limites para tal dimensionalidade. A análise sobre os dados da floresta Amazônica delineou um limite crítico efetivo em até 48% para se obter alta precisão no processo de fusão multi-sensor, considerando o método e a instrumentação utilizada. Portanto, o número de graus de liberdade varia num conjunto de dados de ambiente para ambiente e está associado a capacidade de fusionar diferentes fontes dados. Por fim, a busca pelo entendimento da fusão de dados de SR contribui para o desenvolvimento de sensores de escala regional e global, e o desenvolvimento de novos sensores múltiplos, que podem contribuir para ganhos inestimáveis na pesquisa ambiental mundial.

Asner e colaboradores (2015) fizeram um levantamento sobre as características funcionais das plantas em áreas remotas de ambientes florestais na Amazônia Andina por SR misto (visível, infravermelho próximo e médio), e com dados de LiDAR, discutindo os limites sobre a compreensão de como as comunidades de plantas e os ecossistemas estão mudando ao longo do tempo, fato que ainda é pouco conhecido na literatura. A calibração e validação da resposta de 15 elementos químicos presentes nas plantas do dossel florestal foram feitas com base em dados levantados da rede de 79 parcelas de campo e 1 hectare de área por meio da fusão dados mistos de SR aerotransportado. Discute-se aspectos que limitavam o uso integrado desta tecnologia, tais como a estrutura da vegetação, a química foliar, a geometria de observação (sol e sensor). Os resultados apontam, de forma comparativa, que o levantamento feito por SR misto possui maior precisão, em alguns casos (Clorofila a e b com $R^2 = 0,58$, RMSE de $1,50 \pm 0,71$ e % RMSE de 28,14%), quando aspectos limitantes são resolvidos, estimativas sobre tais características químicas das folhas do que as obtidas de forma exaustiva por parcelas de campo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

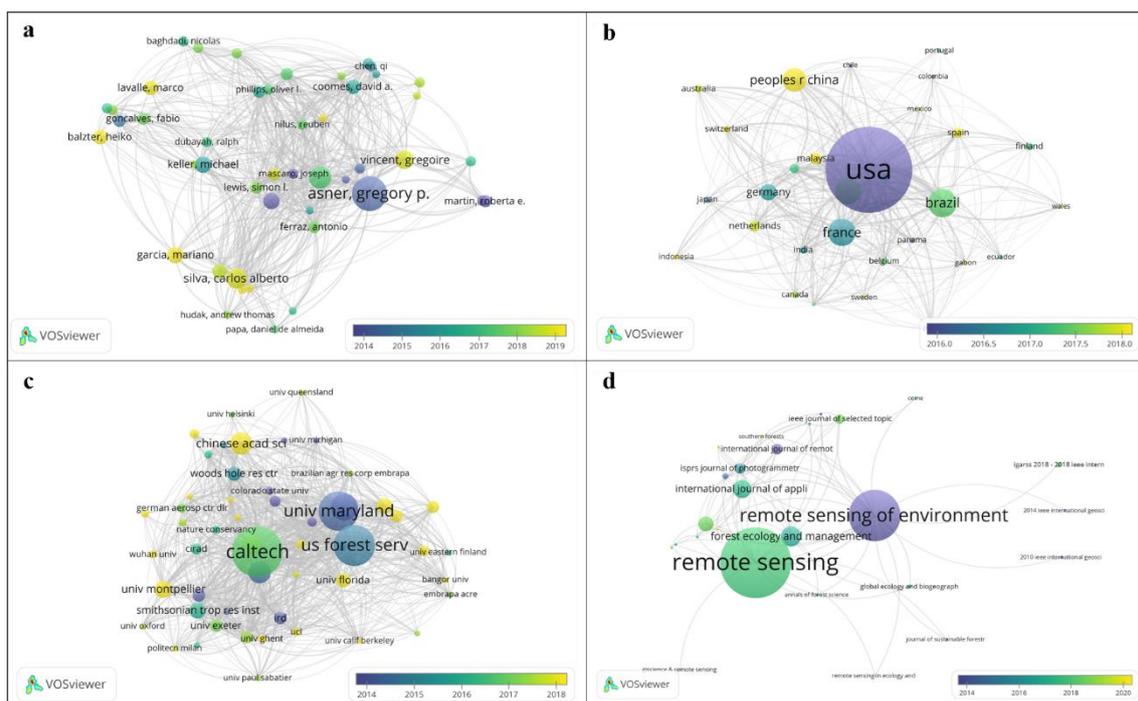
Para este estudo, utilizou-se a combinação de palavras chave: “Lidar” and “tropical forest”, pois foi a que apresentou o melhor resultado em relação ao assunto estudado, e que deu base para a extração das referências potenciais para a revisão sistemática. No primeiro levantamento havia cerca de 404 artigos publicados sobre a temática na base de dados da WoS. Em 15 de junho de 2021 esse valor aumentou para 415 e em 30 de junho estava em 419. Ou seja, esta metodologia precisa ser constantemente atualizada para



possibilitar uma revisão de ponta e completa. Considerando o valor total de 419 artigos encontrados e os processos de triagem e elegibilidade, a amostragem foi reduzida em 32,45% do valor inicial, o que corresponde a 136 artigos, considerando os de revisão, com alto potencial para apoiar a revisão bibliográfica.

A Figura 2 mostra quatro mapas bibliométricos, a, b, c, d, ambos obtidos pelas seguintes combinações: a figura (a) mostra o resultado obtido relacionado à quantidade de citações por autor, a figura (b) mostra a relação entre os principais países, ou seja, sua origem, a figura (c) destaca as principais instituições responsáveis pela produção científica e por último a figura (d) mostra as principais fontes (revistas) das publicações que estão presentes na análise sobre do universo amostral obtidos da WoS e analisado pelo software VOSviewer.

Figura 2: Mapas bibliométricos da amostra: autores (a), países (b), instituições (c) e revistas (d).



Fonte: Web of Science (2021)

Buscando complementar as informações dos mapas bibliométricos foram organizados e destacados os principais autores, países e organizações, apresentados na Tabela 1.

Podemos destacar que a maioria das citações são de Gregory P. Asner (2578), Roberta E. Martin (1116) ambos da Arizona State University, e a maioria está concentrada



nos E.U.A (9386), apesar do Brasil aparecer em terceiro lugar logo depois da Inglaterra. Destacam-se na Tabela 1 também as instituições que mais foram citadas: University of Maryland (2460), National Aeronautics and Space Administration - NASA (405) e Carnegie Institution for Science (2162), dentre outras.

Tabela 1: Principais artigos, autores, países e organizações da amostra.

AUTORES	Citações	Docs	PAÍSES	Citações	Docs	ORGANIZAÇÕES	Citações	Docs
ASNER, GREGORY P.	2578	44	E.U.A	9386	223	UNIV MARYLAND	2460	43
MARTIN, ROBERTA E.	1116	11	INGLATERRA	1601	67	NASA	2405	35
KNAPP, DAVID E.	1013	11	BRASIL	1449	60	CARNEGIE INST SCI	2162	35
BLAIR, JB	949	5	FRANÇA	1414	56	US FOREST SERV	1789	37
MASCARO, JOSEPH	800	11	ALEMANHA	1105	33	CALTECH	1621	47
KENNEDY-BOWDOIN, TY	705	7	ITÁLIA	936	19	UNIV NEW HAMPSHIRE	1354	16
KELLER, MICHAEL	539	13	PANAMÁ	873	18	UNIV MISSOURI	1172	10
SAATCHI, SASSAN	477	15	ÍNDIA	814	17	SMITHSONIAN TROP RES INST	1034	21
HUGHES, R. FLINT	443	6	PAÍSES BAIXOS	727	22	UNIV CONNECTICUT	868	10
PALACE, MICHAEL	429	5	COSTA RICA	613	8	WOODS HOLE RES CTR	722	14
PHILLIPS, OLIVER L.	407	9	GALES	610	10	UNIV LEEDS	613	15
COOMES, DAVID A.	399	14	CHINA	559	44	UNIV CALIF LOS ANGELES	508	14
CLARK, DAVID B.	352	7	AUSTRÁLIA	547	23	UNIV CAMBRIDGE	492	21
KUGLER, FLORIAN	301	6	ESCÓCIA	501	20	STANFORD UNIV	488	8
CHAVE, JEROME	299	9	MALÁSIA	361	32	COLORADO STATE UNIV	476	8
LAURIN, GAIA VAGLIO	296	5	FINLÂNDIA	335	19	UCL	402	10
FERRAZ, ANTONIO	287	10	CANADÁ	298	16	UNIV FLORIDA	389	14
CHEN, QI	284	5	COLOMBIA	256	9	CIRAD	385	10
REJOU-MECHAIN, MAXIME	264	8	ESPANHA	253	20	UNIV EXETER	314	10

Fontes: Web of Science (2021).

A maioria das publicações estão associadas à produção de conhecimento ligada ao campo do SR, por isso as principais revistas internacionais são: Remote Sensing of Environment (4000), Remote Sensing (798) e ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (438), além disso, algumas revistas ligadas a estudos ecológicos como a Biogeosciences (532), conforme é apresentado na Tabela 2.



Tabela 2: Principais citações, fontes de revistas internacionais.

REVISTAS (FONTES)	Citações	Docs
REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	4000	48
REMOTE SENSING	798	65
BIOGEOSCIENCES	532	10
ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING	438	10
ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS	422	9
FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT	409	19
PLOS ONE	397	10
ECOLOGICAL INDICATORS	381	9
INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION	378	16
PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA	274	6
ECOLOGY LETTERS	245	6
ECOLOGICAL APPLICATIONS	215	8
INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING	214	10
BIOTRÓPICA	199	4
FORESTS	143	14
JOURNAL OF APPLIED REMOTE SENSING	141	6
GLOBAL ECOLOGY AND BIOGEOGRAPHY	121	4
METHODS IN ECOLOGY AND EVOLUTION	120	4
CARBON BALANCE AND MANAGEMENT	114	6

Fontes: Web of Science (2021).

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que a estimativa de características estruturais da floresta tropical tem sido feita para apoiar diferentes tipos de abordagens, seja de monitoramento, estimativa de biomassa, análise taxonômica, e o mapeamento da estrutura florestal, o que podemos verificar pelos títulos.

Tabela 3: Relação dos artigos internacionais mais citados e seus respectivos líderes.

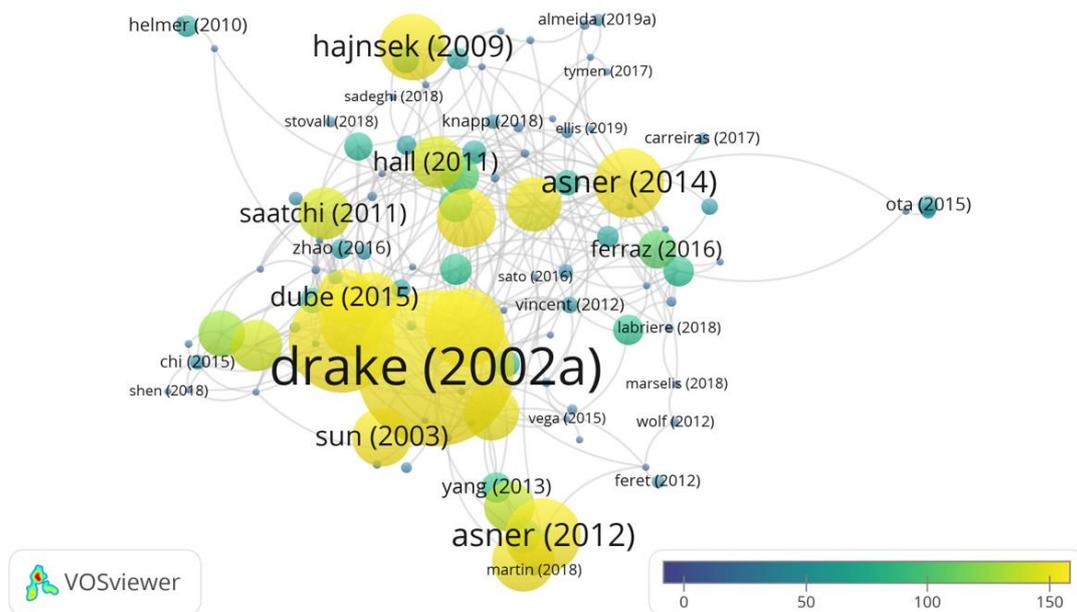
LÍDERES	Citações	TÍTULOS ORIGINAIS DOS ARTIGOS
DRAKE (2002A)	412	ESTIMATION OF TROPICAL FOREST STRUCTURAL CHARACTERISTICS USING LARGE-FOOTPRINT LIDAR
NAGENDRA (2013)	301	REMOTE SENSING FOR CONSERVATION MONITORING: ASSESSING PROTECTED AREAS, HABITAT EXTENT, HABITAT CONDITION, SPECIES DIVERSITY, AND THREATS
ZHENG (2004)	276	ESTIMATING ABOVEGROUND BIOMASS USING LANDSAT 7 ETM+ DATA ACROSS A MANAGED LANDSCAPE IN NORTHERN WISCONSIN, USA
MORTON (2014)	250	AMAZON FORESTS MAINTAIN CONSISTENT CANOPY STRUCTURE AND GREENNESS DURING THE DRY SEASON
ASNER (2012A)	229	A UNIVERSAL AIRBORNE LIDAR APPROACH FOR TROPICAL FOREST CARBON MAPPING
ASNER (2009A)	213	AIRBORNE SPECTRANOMICS: MAPPING CANOPY CHEMICAL AND TAXONOMIC DIVERSITY IN TROPICAL FORESTS
DRAKE (2002B)	207	SENSITIVITY OF LARGE-FOOTPRINT LIDAR TO CANOPY STRUCTURE AND BIOMASS IN A NEOTROPICAL RAINFOREST
ASNER (2012B)	200	CARNEGIE AIRBORNE OBSERVATORY-2: INCREASING SCIENCE DATA DIMENSIONALITY VIA HIGH-FIDELITY MULTI-SENSOR FUSION
ASNER (2014)	182	MAPPING TROPICAL FOREST CARBON: CALIBRATING PLOT ESTIMATES TO A SIMPLE LIDAR METRIC
DUBAYAH (2010)	177	ESTIMATION OF TROPICAL FOREST HEIGHT AND BIOMASS DYNAMICS USING LIDAR REMOTE SENSING AT LA SELVA, COSTA RICA
HAINSEK (2009)	176	TROPICAL-FOREST-PARAMETER ESTIMATION BY MEANS OF POL-INSAR: THE INDREX-II CAMPAIGN
ASNER (2009B)	169	TROPICAL FOREST CARBON ASSESSMENT: INTEGRATING SATELLITE AND AIRBORNE MAPPING APPROACHES
ASNER (2008A)	169	INVASIVE PLANTS TRANSFORM THE THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF RAIN FORESTS
FASSNACHT (2014)	166	IMPORTANCE OF SAMPLE SIZE, DATA TYPE AND PREDICTION METHOD FOR REMOTE SENSING-BASED ESTIMATIONS OF ABOVEGROUND FOREST BIOMASS
ASNER (2015)	163	QUANTIFYING FOREST CANOPY TRAITS: IMAGING SPECTROSCOPY VERSUS FIELD SURVEY
SUN (2003)	155	VALIDATION OF SURFACE HEIGHT FROM SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION USING SHUTTLE LASER ALTIMETER
HYDE (2005)	154	MAPPING FOREST STRUCTURE FOR WILDLIFE HABITAT ANALYSIS USING WAVEFORM LIDAR: VALIDATION OF MONTANE ECOSYSTEMS
DUBE (2015)	148	EVALUATING THE UTILITY OF THE MEDIUM-SPATIAL RESOLUTION LANDSAT 8 MULTISPECTRAL SENSOR IN QUANTIFYING ABOVEGROUND BIOMASS IN UMGENI CATCHMENT, SOUTH AFRICA
LAURIN (2014)	147	ABOVE GROUND BIOMASS ESTIMATION IN AN AFRICAN TROPICAL FOREST WITH LIDAR AND HYPERSPECTRAL DATA

Fontes: Web of Science (2021).



Em apoio aos resultados apresentados na Tabela 3, a Figura 3 procura destacar os principais autores e seus respectivos documentos citados, além das relações de influência por meio de um mapa bibliométrico.

Figura 3: Artigos mais citados da amostra.



Fontes: Web of Science, elaborado no VOSviewer (2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem inúmeras abordagens baseadas no uso de dados LiDAR em escala local e alguns em escala regional, mas podemos afirmar que existem poucos estudos em escala global associados a investigação de ambientes de florestas, e até este momento nenhum sobre a Mata Atlântica. Os motivos dessa constatação ainda precisam de maiores evidências e aprofundamento das discussões.

Diversos trabalhos apontam o avanço que haverá neste campo de investigação quando forem disponibilizados dados em escala global por meio de sistemas sensores de nível orbital, e há grande expectativa para os dados do programa GEDI.

Os estudos sobre a estrutura de florestas tropicais são diversos e apresentam inúmeras metodologias que apoiam a produção de novos conhecimentos sobre o assunto,



portanto, viabilizam a busca de respostas a questões científicas levantadas por este estudo de revisão e demonstram que existem diversas referências metodológicas para tal.

Nesta revisão foram apresentadas uma pequena amostra de abordagens com medidas diretas e estimativas por meio de modelagem em diversos trabalhos que evidenciam a alta precisão e potencial uso de dados LiDAR em várias escalas. Entretanto, são recorrentes em vários destes estudos apontamentos sobre os altos custos para sua obtenção, pois na sua maioria são obtidos por meios de levantamentos aerotransportados e, até o momento deste estudo, isso ainda continua sendo uma realidade, o que gera alta restrição de acesso a dados desse tipo, sobretudo aqueles produzidos por sistemas sensores LiDAR acoplados em VANT.

A metodologia de revisão sistemática utilizada neste levantamento bibliométrico se demonstrou muito robusta e possibilitou um levantamento qualitativo e quantitativo adequado de referências mais citadas. Ainda será necessário completar exhaustivamente esta revisão, que até o momento conseguiu atingir cerca de 32% deste primeiro levantamento estimado para a construção de uma tese de doutoramento sobre o tema. Entretanto, até o momento, isso possibilitou destacar a tendência crescente em usar dados do tipo LiDAR associadas a imagens espectrais de média-alta resolução, e outros produtos de SR, demonstrando bons resultados em análises que estão intrinsecamente ligadas as informações sobre a estrutura de florestas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S. et al. Approaches of satellite remote sensing for the assessment of above-ground biomass across tropical forests: Pan-tropical to national scales. **Remote Sensing**, v. 12, n. 20, p. 1–38, 2020.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, v. 89, n. 4, p. 913–931, 2014.

ASNER, G. P. et al. Invasive plants transform the three-dimensional structure of rain forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 105, n. 11, p. 4519–4523, 2008.

ASNER, G. P. et al. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. **Ecosystem Ecology**, v. 168, p. 1147–1160, 2012a.

ASNER, G. P. et al. Carnegie Airborne Observatory-2: Increasing science data dimensionality via high-fidelity multi-sensor fusion. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 454–465, 2012b.



ASNER, G. P. et al. Quantifying forest canopy traits: Imaging spectroscopy versus field survey. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 15–27, 2015.

ASNER, G. P.; MASCARO, J. Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 614–624, 2014.

COBO, M. J. et al. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 62, n. 7, p. 1382–1402, 2011.

BROWN, S.; LUGO, A. E. Trailblazing the carbon cycle of tropical forests from puerto rico. **Forests**, v. 8, n. 4, p. 1–18, 2017.

CHAZDON, R. L. et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, v. 2, n. 5, p. e1501639, 2016.

COBO, M. J. et al. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 62, n. 7, p. 1382–1402, 2011.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. DE A. Uso do Lidar como Ferramenta para o Manejo de Precisão em Florestas Tropicais. 1a ed. Brasília: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária** (Embrapa Acre) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2014.

DA PONTE, E. et al. Tropical forest cover dynamics for Latin America using Earth observation data: a review covering the continental, regional, and local scale. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 12, p. 3196–3242, 2015.

DITTMANN, S.; THIESSEN, E.; HARTUNG, E. Applicability of different non-invasive methods for tree mass estimation: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 398, p. 208–215, 2017.

DUBE, T.; MUTANGA, O. Evaluating the utility of the medium-spatial resolution Landsat 8 multispectral sensor in quantifying aboveground biomass in uMgeni catchment, South Africa. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 101, p. 36–46, 2015.

DUPUIS, C. et al. How can remote sensing help monitor tropical moist forest degradation?-A systematic review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 7, 2020.

GHAZOUL, J. et al. Conceptualizing Forest Degradation. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 30, n. 10, p. 622–632, 2015.

GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231–244, 2010.



HEINRICH, V. H. A. et al. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1–11, 2021.

JACKSON, C. M.; ADAM, E. Remote sensing of selective logging in tropical forests: Current state and future directions. **IForest**, v. 13, n. 4, p. 286–300, 2020.

JENSEN, J. R. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. 2a ed. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2014. v. 1.

KUMAR, L. et al. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 097696, 2015.

LEFSKY, M. A. et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies. **BioScience**, v. 52, n. 1, p. 19–30, 2002.

MOHD ZAKI, N. A.; ABD LATIF, Z. Carbon sinks and tropical forest biomass estimation: a review on role of remote sensing in aboveground-biomass modelling. **Geocarto International**, v. 32, n. 7, p. 701–716, 2017.

MORTON, D. C. et al. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. **Nature**, v. 506, p. 221–236, 2014.

NAGENDRA, H. et al. Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. **Ecological Indicators**, v. 33, p. 45–59, 2013.

NGUYEN, T. H. et al. Landsat time-series for estimating forest aboveground biomass and its dynamics across space and time: A review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 1–25, 2020.

PAN, Y. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 988–993, 2011.

REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, p. 208–214, 2018.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 7 fev. 2009.

SILVA, C. H. L. et al. Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. **Science Advances**, v. 6, n. 40, p. 1–10, 2020.

SILVA JUNIOR, C. H. L. Dinâmica da formação de bordas florestais e seu impacto nos



estoques de carbono na Bacia Amazônica utilizando sensoriamento remoto. [s.l.] **INPE**, 2018.

VAGLIO LAURIN, G. et al. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with lidar and hyperspectral data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 89, p. 49–58, 2014.

VAN ECK, N. J. et al. Automatic term identification for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 82, n. 3, p. 581–596, 2010.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning - An introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2–3, p. 68–82, 1999.

WINGATE, V. R. et al. Estimating aboveground woody biomass change in Kalahari woodland: Combining field, radar, and optical data sets. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 2, p. 577–606, 2018.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Airborne Laser Scanner technology for estimating dendrometric variables. **Scientia Florestalis**, v. 36, n. 80, p. 295–306, 2008.

ZHENG, D. et al. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM + data across a managed landscape in northern Wisconsin , USA. v. 93, p. 402–411, 2004.

ZHU, Y. et al. Estimation of forest biomass in Beijing (China) using multisource remote sensing and forest inventory data. **Forests**, v. 11, n. 2, p. 1–17, 2020.