CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA E DA DINÂMICA DO DOSSEL DE UMA FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA-CERRADO POR LiDAR AEROTRANSPORTADO MULTITEMPORAL

Lucas Ricardo Ferreira dos Santos [1] ; Fábio Farias Pereira [2] ; David Medvigy [3] ; João Guilherme Batista da Silva [4]; Arthur Kauê Buarque da Silva [5] ; Alysson Deodato Ferreira [6]; Johnny Cavalcante da Silva [7] ; Lauan Felipe de Rocha Oliveira [8] & Luiz Henrique da Silva [9]

RESUMO – Florestas de transição Amazônia-Cerrado estão entre os ecossistemas tropicais mais sensíveis ao estresse hídrico sazonal e às perturbações antrópicas, porém sua estrutura tridimensional ainda é pouco caracterizada. Este trabalho descreve a estrutura e a dinâmica do dossel do sítio Feliz Natal (FN2; ~11,86° S, 54,19° O) a partir de três levantamentos de LiDAR aerotransportado em 2013, 2016 e 2018, do projeto Sustainable Landscapes Brasil, cobrindo ~10 km² em recobrimento triplo. Geramos modelos de altura de dossel (MAD) a 1 m, métricas verticais de estrutura a 50 m e a densidade de carbono acima do solo (ACD), e quantificamos a mudança estrutural entre aquisições. O dossel apresentou altura média de ~18 m e altura de topo de ~33 m, estável entre as três datas. A ACD estimada situou-se entre ~8 e ~10 kg C m^{-2}, que ficou abaixo de valores de inventário regionais, diferença atribuível ao uso de coeficientes não recalibrados localmente. A análise multitemporal revelou um padrão de mudança de duas componentes: crescimento difuso predominante (ΔAltura média de +0,8 m em cinco anos; ΔACD de +1,6 kg C m^{-2}) sobreposto a perdas localizadas e intensas associadas a manchas de distúrbio. Os resultados fornecem uma linha de base estrutural para o sítio e demonstram o potencial do LiDAR multitemporal para detecção de mudança em florestas de transição.

Palavras-Chave – LiDAR; estrutura do dossel; floresta de transição; densidade de carbono; detecção de mudança.

[1]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, lcsoztx@gmail.com
[2]) Afiliação: Laboratótio de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, fabio.pereira@ceca.ufal.br
[3]) Afiliação: Department of Biological Sciences, University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, USA, dmedvigy@nd.edu
[4]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, joao.guilherme@ceca.ufal.br
[5]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, arthur.buarque@ceca.ufal.br
[6]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, alysson.ferreira@ceca.ufal.br
[7]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, johnny.silva@ceca.ufal.br
[8]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, lauan.oliveira@ceca.ufal.br
[9]) Afiliação: Laboratório de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil

INTRODUÇÃO

As florestas situadas na transição entre a Amazônia e o Cerrado, no chamado arco do desmatamento, ocupam um gradiente climático marcado por estação seca prolongada (cerca de cinco meses) e estão sujeitas simultaneamente ao estresse hídrico sazonal e à pressão de uso da terra. Essas florestas armazenam estoques de carbono expressivos, mas heterogêneos, e respondem de forma particularmente sensível a secas e a distúrbios como exploração madeireira e fogo. Caracterizar sua estrutura tridimensional é, portanto, um passo necessário tanto para a contabilidade de carbono quanto para a compreensão de sua dinâmica.

O LiDAR aerotransportado tornou-se a principal ferramenta para descrever a estrutura vertical de florestas tropicais, permitindo estimar altura de dossel, abertura e densidade de carbono acima do solo (ACD) com base em métricas do perfil de retornos. Quando há aquisições repetidas sobre a mesma área, o LiDAR multitemporal possibilita ainda a detecção direta de mudanças estruturais, separando o crescimento difuso do dossel das perdas associadas a distúrbios.

Este trabalho caracteriza a estrutura e a dinâmica do dossel do sítio Feliz Natal (FN2), em Mato Grosso, a partir de três levantamentos LiDAR (2013, 2016 e 2018). O objetivo é (i) estabelecer uma linha de base estrutural e de carbono para o sítio e (ii) quantificar a mudança estrutural no intervalo de cinco anos, distinguindo crescimento de perda por distúrbio.

As mudanças estruturais em florestas de transição Amazônia-Cerrado refletem respostas a variações na disponibilidade hídrica. Florestas de transição experimentam estações secas prolongadas, e a estrutura do dossel é influenciada por eventos de seca e estresse hídrico crônico. A detecção multitemporal de alterações no dossel fornece, portanto, uma ferramenta para avaliar a vulnerabilidade à seca desses ecossistemas, informando como mudanças climáticas podem afetar seu estoque de água e funcionamento hidrológico.

MATERIAS E MÉTODOS

O sítio FN2 localiza-se próximo a Feliz Natal, Mato Grosso (~11,86° S, 54,19° O), em floresta de transição Amazônia–Cerrado sob clima sazonal (precipitação anual ~1.900 mm; estação seca de aproximadamente cinco meses). Foram utilizados três levantamentos de LiDAR aerotransportado do projeto Sustainable Landscapes Brasil (EMBRAPA), adquiridos em 2013, 2016 e 2018, com recobrimento espacial praticamente integral nas três datas sobre uma área de aproximadamente 10 km².

As nuvens de pontos foram normalizadas pela altura do terreno, estimada a partir dos retornos classificados como solo, e harmonizadas para uma densidade comum de pulsos entre as três datas, a fim de evitar que diferenças de densidade fossem interpretadas como mudança estrutural. Retornos com altura normalizada superior a 55 m foram descartados como ruído atmosférico (e.g. aves, nuvens), presente nos dados brutos. Sobre uma grade comum, geramos modelos de altura de dossel (MAD) a 1 m de resolução e, a 50 m, um conjunto de métricas de estrutura vertical (altura média, percentis inferiores, intervalo interquartílico e curtose do perfil de retornos), seguindo a abordagem de Longo et al. (2016). A coregistração entre datas foi verificada sobre superfícies estáveis de baixo dossel, apresentando viés vertical inferior a 0,1 m e deslocamento horizontal nulo na resolução de análise.

Define-se aqui a altura média do dossel como a média do MAD (superfície de topo do dossel) por célula, métrica distinta da altura média de todos os retornos, que é enviesada para baixo por incluir o sub-bosque e o solo. A Figura 1 ilustra a cadeia de processamento sobre um levantamento real da região: o MAD a 1 m (a), um transecto vertical da nuvem de pontos (b) e a distribuição de alturas normalizadas (c), na qual se distinguem o pico de retornos próximos ao solo e a moda do dossel. O processamento desse levantamento resultou em altura média do dossel de 15,7 m e altura de topo (P95) de aproximadamente 24–31 m, emonstrando a consistência da cadeia sobre dados reais.

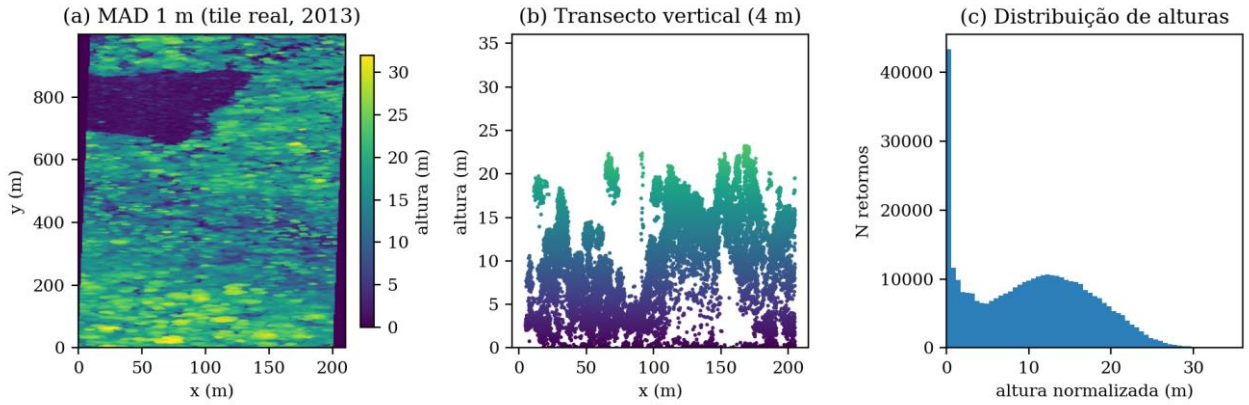


Figura 1 – Ilustração da cadeia de processamento sobre um levantamento LiDAR real de FN2 (2013): (a) modelo de altura de dossel a 1 m; (b) transecto vertical da nuvem de pontos (faixa de 4 m); (c) distribuição de alturas normalizadas.

A densidade de carbono acima do solo (ACD) foi estimada pelo modelo alométrico de Longo et al. (2016), calibrado para a Amazônia brasileira a partir das métricas de estrutura. A mudança estrutural foi quantificada pela diferença célula a célula das métricas entre aquisições (2013→2016, 2016→2018 e 2013→2018), sobre a mesma grade, permitindo a separação entre crescimento difuso e perdas localizadas.

Há uma ressalva metodológica sobre as estimativas de ACD. Elas baseiam-se em coeficientes alométricos publicados aplicados a esta região, sem calibração local por inventário; serão, portanto, interpretadas como aproximações de primeira ordem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o campo de altura média e de altura do topo do dossel em 2013. A floresta intacta do sítio exibe um dossel relativamente alto e contínuo, com altura média em torno de 18 m e altura de topo (percentil 95) de aproximadamente 33 m, entremeado por manchas mais baixas que correspondem a clareiras e áreas degradadas.

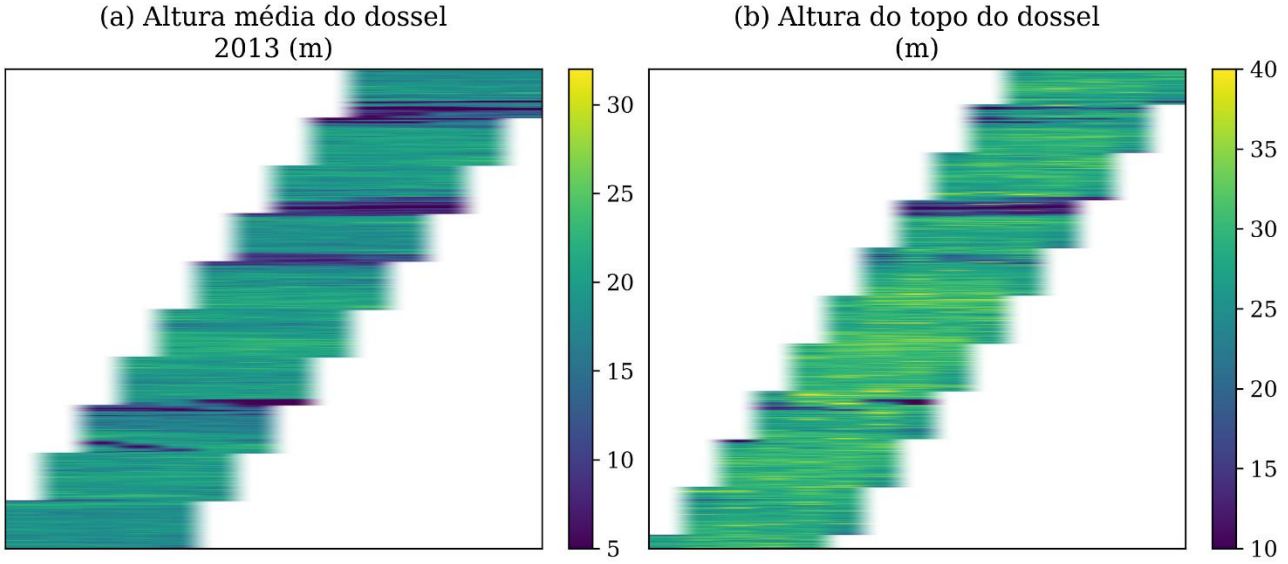


Figura 2 – Estrutura do dossel em FN2 (2013): (a) altura média do dossel e (b) altura do topo do dossel, em metros.

A distribuição da altura média do dossel (Figura 3) é unimodal, com moda em torno de 19-20 m, e praticamente sobreposta entre as três aquisições; uma cauda inferior e um pequeno pico próximo de zero correspondem a clareiras e bordas. A estabilidade da forma da distribuição entre datas é coerente com uma floresta madura, na qual o crescimento difuso desloca apenas marginalmente a moda.

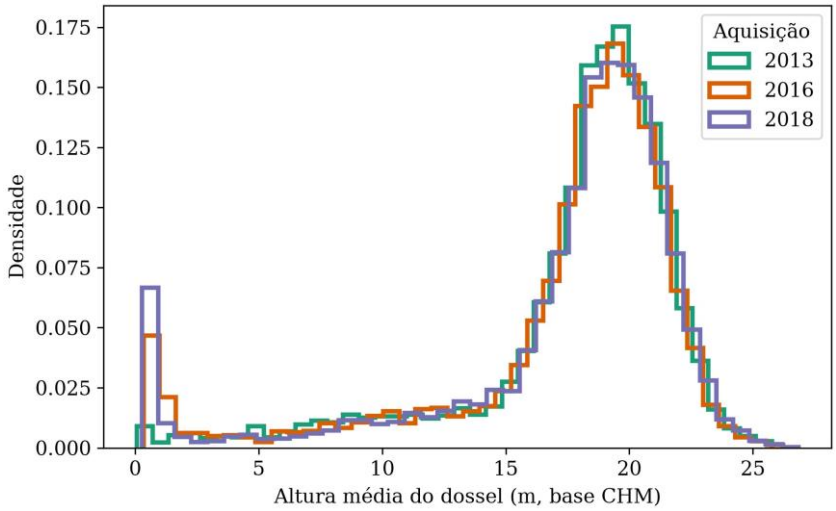


Figura 3 – Distribuição da altura média do dossel por aquisição (2013, 2016, 2018).

A ACD estimada (Figura 4a) apresentou média de ~8 kg C m⁻² em 2013, com forte heterogeneidade espacial. Esse valor situa-se abaixo das estimativas de inventário para florestas de transição da região (da ordem de 16 kg C m⁻²); a diferença é atribuível principalmente ao uso de coeficientes alométricos não recalibrados localmente e à definição das métricas de altura empregadas, e deve, portanto, ser interpretada com cautela. A relação entre altura média e ACD (Figura 4b) é positiva, ainda que dispersa, com alguns valores extremos decorrentes da instabilidade do modelo para combinações de métricas com percentis inferiores próximos de zero.

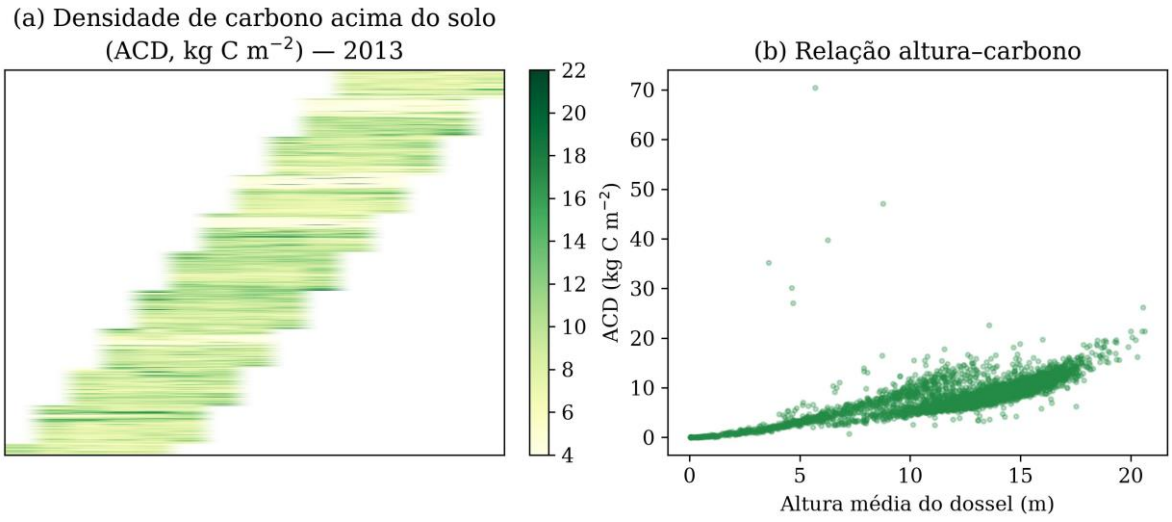


Figura 4 – (a) Densidade de carbono acima do solo (ACD) em 2013 e (b) relação altura–carbono célula a célula.

A análise multitemporal (Figura 5) revela um padrão de mudança de duas componentes. Sobre a maior parte da área, observa-se um sinal de crescimento difuso do dossel (ΔAltura média de +0,81 m e ΔACD de +1,57 kg C m⁻² no intervalo de cinco anos; a ACD média subiu de ~8,2 para ~9,8 kg C m⁻²). Sobreposta a esse fundo, há perdas localizadas e intensas, reduções de altura de até ~ −15 m, concentradas em manchas que correspondem a distúrbios, como exploração madeireira e/ou fogo. O

histograma de ΔAltura (Figura 5c) sintetiza esse contraste uma vez que a moda é levemente positiva, indicando crescimento generalizado, enquanto uma cauda negativa pronunciada captura as perdas concentradas. O resultado líquido é de acúmulo de carbono no período, apesar dos eventos de perda.

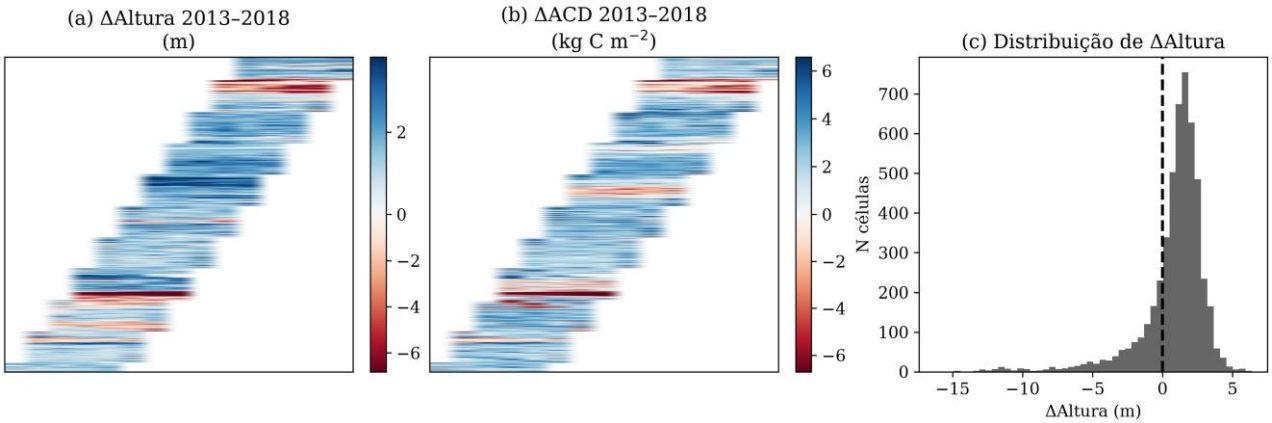


Figura 5 – Mudança estrutural 2013–2018: (a) ΔAltura, (b) ΔACD e (c) distribuição de ΔAltura. Azul: ganho; vermelho: perda.

A Tabela 1 resume as métricas estruturais e de carbono por aquisição e a mudança no período. O contraste entre a estabilidade das médias e a presença de perdas localizadas indica que, em florestas de transição, a dinâmica de carbono em escala de poucos anos é dominada por eventos de distúrbio espacialmente restritos, mais do que por tendências difusas, um padrão de difícil detecção por métodos que se baseiam apenas em médias de área.

Tabela 1 – Síntese das métricas estruturais e de carbono em FN2.

Aquisição	Alt. média (m)	Topo P95 (m)	ACD (kg C m⁻²)	IQ vertical (m)
2013	17,9	33,6	8,2 ± 3,3	8,8
2016	17,3	33,3	9,3 ± 3,9	8,1
2018	17,4	33,2	9,8 ± 4,1	8,2
Δ 2013–2018	+0,81	—	+1,57	—

A floresta de transição analisada está em uma região onde o ciclo hídrico sazonal exerce forte influência sobre a biologia vegetal. Os resultados que mostram estabilidade de altura média do dossel em grande parte da área sugerem que, apesar das secas periódicas, a floresta manteve sua estrutura e provavelmente continuou regulando fluxos de água de forma estável. Entretanto, as perdas localizadas observadas podem corresponder a setores submetidos a estresse hídrico maior. Esses padrões concordam com evidências de que déficits de água aumentam a mortalidade de árvores e a formação de gaps, alterando a capacidade de infiltração e a cobertura do solo.

Em termos de gestão, a aplicação dos achados está em identificar áreas suscetíveis a degradação hidrológica futura. As zonas onde o LiDAR detectou redução significativa de altura ou biomassa

podem ser vistas como sinais antecipados de fragilidade: essas partes da mata possivelmente contribuem menos para interceptar e filtrar a chuva, podendo exigir intervenções (como restauros florestais) para evitar aumento do escoamento e perda de umidade do solo. Já áreas sem mudanças estruturais indicam resiliência hidrológica.

Esse tipo de análise também pode alimentar modelos hidrológicos regionais. A integração de dados multitemporais de dossel pode melhorar simulações de cenário, mostrando por exemplo como eventos de El Niño ou mudanças no regime de chuvas afetarão o balanço hídrico da bacia. Finalmente, os resultados enfatizam que a manutenção da integridade estrutural da floresta (como observado) é crítica para manter a disponibilidade de água na região. A continuidade do monitoramento LiDAR em intervalos regulares permitirá detectar tendências de secas emergentes e ajustar estratégias de adaptação na gestão da bacia para garantir segurança hídrica na transição Amazônia–Cerrado.

LIMITAÇÕES

Três limitações devem ser consideradas. Primeiro, as estimativas de ACD utilizam coeficientes alométricos publicados sem recalibração local por inventário, o que recomenda interpretá-las como aproximações de primeira ordem; medições de campo co-localizadas permitiriam ajuste regional. Segundo, a atribuição das perdas a tipos específicos de distúrbio (exploração madeireira versus fogo) requer integração com séries temporais ópticas (por exemplo, Landsat), aqui apenas indicada. Terceiro, a ausência de levantamento LiDAR anterior a 2013 impede a reconstrução do estado pré-distúrbio das manchas degradadas, limitando a inferência sobre trajetórias de recuperação.

CONCLUSÕES

O LiDAR multitemporal permitiu caracterizar de forma consistente a estrutura e a dinâmica do dossel de uma floresta de transição Amazônia–Cerrado. O sítio FN2 apresenta dossel maduro (~17–18 m de altura média, ~33 m de topo), estável entre as três datas. A ACD estimada (~8–10 kg C m^{-2}) ficou abaixo de inventários regionais, evidenciando a necessidade de calibração local dos coeficientes. A dinâmica de cinco anos é caracterizada por crescimento difuso predominante, com acúmulo líquido de carbono, sobreposto a perdas localizadas e intensas associadas a distúrbios, padrão que ressalta o papel dos eventos espacialmente restritos na dinâmica de carbono dessas florestas. A linha de base estrutural aqui estabelecida e o produto de detecção de mudança constituem insumos diretos para a inicialização e a validação de modelos de demografia florestal no sítio, como o Ecosystem Demography (ED).

AGRADECIMENTOS

Aos provedores dos dados do projeto Sustainable Landscapes Brasil (EMBRAPA) e às agências brasileiras de fomento à pesquisa.

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), através do projeto "Assessing the feasibility of integrating Atlantic Forest dynamics into the Tree2Globe global forest reanalysis system". Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento concedido via Chamada Universal 2025 para o projeto "Até que ponto herbívoros invertebrados influenciam a absorção de água e nitrogênio pelas plantas em florestas tropicais?", e pelo suporte no âmbito do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) "Bioinovações para Agricultura Sustentável".

REFERÊNCIAS

BECKNELL, J. M. et al. Landscape-scale lidar analysis of aboveground biomass distribution in secondary tropical forests. Biotropica, v. 50, n. 3, p. 520–530, 2018.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global Change Biology, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.

HURTT, G. C. et al. Beyond potential vegetation: combining lidar data and a height-structured model for carbon studies. Ecological Applications, v. 14, n. 3, p. 873–883, 2004.

LONGO, M. et al. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. Global Biogeochemical Cycles, v. 30, n. 11, p. 1639–1660, 2016.

SILVA, C. A. et al. Comparison of small- and large-footprint lidar characterization of tropical forest aboveground structure and biomass. IEEE J-STARS, v. 11, n. 10, 2018.