XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE FLORESTA ATLÂNTICA NO SUL DA BAHIA POR LiDAR AEROTRANSPORTADO: PROCESSAMENTO E VIABILIDADE

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

RESUMO – Apresenta-se um fluxo de processamento, reprodutível e de código aberto, para a caracterização estrutural de florestas atlânticas a partir de nuvens de pontos de LiDAR aerotransportado, aplicado a um remanescente no sul da Bahia (~14,47° S, 39,10° O). O fluxo abrange a normalização pela altura do terreno, a filtragem de ruído, a geração de modelos de altura de dossel a 1 m e o cálculo de métricas de estrutura a 50 m, processando os tiles amostrais sequencialmente. A elevada densidade de pulsos (~65 pontos m^{-2}) e a classificação de retornos em estratos asseguraram a robustez das métricas. O sítio apresentou dossel maduro (altura média ~18,6 m, topo P95 ~29 m, cobertura ~90%). Demonstra-se a viabilidade técnica da caracterização estrutural de remanescentes atlânticos do Nordeste a partir de dados públicos.

ABSTRACT – This study presents a reproducible, open-source processing workflow for the structural characterization of Atlantic Forest ecosystems using airborne LiDAR point clouds, applied to a forest remnant in southern Bahia, Brazil (~14.47° S, 39.10° W). The workflow includes terrain-height normalization, noise filtering, generation of 1-m canopy height models, and calculation of structural metrics at 50-m resolution, with sample tiles processed sequentially. The high pulse density (~65 points m^{-2}) and the classification of returns into vegetation strata ensured the robustness of the derived metrics. The study site exhibited characteristics of a mature forest canopy, with a mean canopy height of approximately 18.6 m, a P95 canopy-top height of about 29 m, and canopy cover near 90%. The results demonstrate the technical feasibility of structurally characterizing Atlantic Forest remnants in northeastern Brazil using publicly available airborne LiDAR data.

[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, alysson.ferreira@ceca.ufal.br
[2]) Afiliação: Laboratótio de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, fabio.pereira@ceca.ufal.br
[3]) Afiliação: Department of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University, Lund, Suécia; Department of Earth and Environmental Sciences (MGeo), Lund University, Lund, Suécia, thomas.pugh@nateko.lu.se[3]) Afiliação: Department of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University, Lund, Suécia; Department of Earth and Environmental Sciences (MGeo), Lund University, Lund, Suécia, thomas.pugh@nateko.lu.se
[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, lauan.oliveira@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, joao.guilherme@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, arthur.buarque@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, lcsoztx@gmail.com
[9]) Afiliação: Laboratório de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil

Palavras-Chave – LiDAR; processamento; modelo de altura de dossel; Mata Atlântica.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade crescente de dados públicos de LiDAR aerotransportado sobre florestas brasileiras abre oportunidades para a caracterização estrutural de remanescentes de Mata Atlântica. Contudo, a transformação de nuvens de pontos brutas em métricas estruturais confiáveis exige um fluxo de processamento cuidadoso, com tratamento explícito da normalização do terreno, da densidade de pulsos e do ruído.

Este trabalho descreve e demonstra um fluxo de processamento reprodutível para a caracterização estrutural de florestas atlânticas, avaliando sua viabilidade sobre um remanescente de alta qualidade de dados no sul da Bahia.

Além dos objetivos estruturais, as métricas derivadas de LiDAR têm forte aplicabilidade em hidrologia florestal. Modelos distribuidos de bacia hidrográfica (como DHSVM, SWAT, RHESSys) exigem parâmetros de cobertura e altura do dossel para simular interceptação da chuva, evapotranspiração e balanço hídrico. Nesse contexto, um fluxo de processamento reprodutível e aberto, capaz de extrair métricas precisas de dossel, apoia estudos de recursos hídricos ao fornecer insumos georreferenciados para modelagem hidrológica (Figura 1).

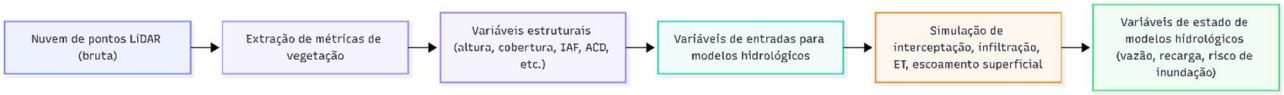


Figura 1 – Fluxo de trabalho integrando métricas LiDAR em modelos hidrológicos: os dados pontuais do LiDAR podem ser processados em métricas estruturais (altura do dossel, cobertura, ACD etc.), que alimentam componentes de interceptação, evapotranspiração e escoamento no modelo hidrológico, gerando previsões de vazões, recarga e vulnerabilidade a enchentes.

A relevância de um fluxo reprodutível é particularmente alta no contexto dos recursos hídricos do Nordeste. Os remanescentes de Mata Atlântica do litoral leste e da Zona da Mata regulam o regime de mananciais que abastecem importantes núcleos urbanos e sistemas agrícolas, de modo que a sua estrutura, e a degradação dessa estrutura, repercute diretamente sobre a interceptação, a evapotranspiração e a recarga. Caracterizar essa estrutura de forma padronizada e de baixo custo é um pré-requisito para incorporar a vegetação florestal aos instrumentos de gestão de bacias, hoje majoritariamente baseados em dados pluviométricos e fluviométricos.

MATERIAS E MÉTODOS

O sítio CON localiza-se no sul da Bahia (~14,47° S, 39,10° O; zona UTM 24S), em remanescente de Mata Atlântica sob relevo de morros costeiros (variação altimétrica de ~100 m na

área analisada). Foi utilizado um levantamento de LiDAR aerotransportado do projeto Sustainable Landscapes Brasil (EMBRAPA), adquirido em 2015, com densidade de pulsos elevada (~65 pontos m^{-2}) e classificação de retornos em estratos (solo, vegetação baixa, média e alta), favorável à caracterização estrutural. A aquisição é composta por tiles amostrais distribuídos pelo sítio (em um arranjo espacialmente disperso, cobrindo uma extensão da ordem de 8,5 × 9 km), e não por um recobrimento contínuo; as métricas reportadas são agregadas sobre esses tiles. Por se tratar de uma única data de aquisição, a análise é de caracterização, não de detecção de mudança.

As nuvens de pontos foram normalizadas pela altura do terreno, estimada a partir dos retornos classificados como solo, e os retornos com altura normalizada superior a 60 m foram descartados como ruído. Geramos modelos de altura de dossel (MAD) a 1 m de resolução e métricas de estrutura a 50 m. Define-se altura média do dossel como a média do MAD por célula, distinta da média de todos os retornos (enviesada para baixo pelo sub-bosque).

O fluxo, implementado em Python (laspy, NumPy, SciPy), executa: (i) construção do modelo digital de terreno a partir dos retornos de solo; (ii) normalização das alturas; (iii) filtragem de ruído (alturas acima de 60 m); (iv) geração do modelo de altura de dossel a 1 m; e (v) cálculo de métricas de estrutura a 50 m. O fluxo processa os tiles sequencialmente, sendo escalável ao conjunto completo de dados.

As escolhas metodológicas visam à robustez e à comparabilidade. A resolução de 1 m para o modelo de altura de dossel preserva a feição de copas individuais e de clareiras, enquanto a agregação a 50 m para as métricas estruturais reduz o ruído de amostragem e alinha-se à escala de calibração dos modelos altura–biomassa publicados. A filtragem de retornos acima de 60 m elimina ecos atmosféricos sem truncar emergentes reais. A definição da altura média do dossel como média do MAD, e não como média de todos os retornos, evita o viés de subestimação introduzido pelos retornos de sub-bosque e de solo, assegurando que a métrica reflita efetivamente a superfície da copa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 ilustra o fluxo sobre um levantamento real: o modelo de altura de dossel, um transecto vertical da nuvem de pontos e a distribuição de alturas normalizadas, na qual se distinguem o pico de retornos próximos ao solo e a moda do dossel. A qualidade dos dados (Figura 3), densidade de ~65 pontos m^{-2} e classificação em quatro estratos, sustenta métricas estruturais robustas.

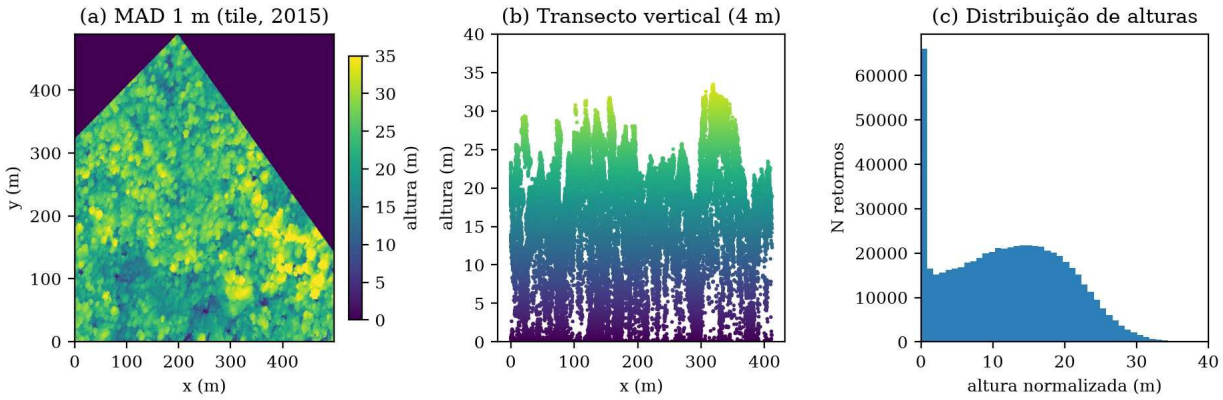


Figura 2 – Fluxo de processamento (dados reais de CON, 2015): (a) MAD a 1 m; (b) transecto vertical; (c) distribuição de alturas.

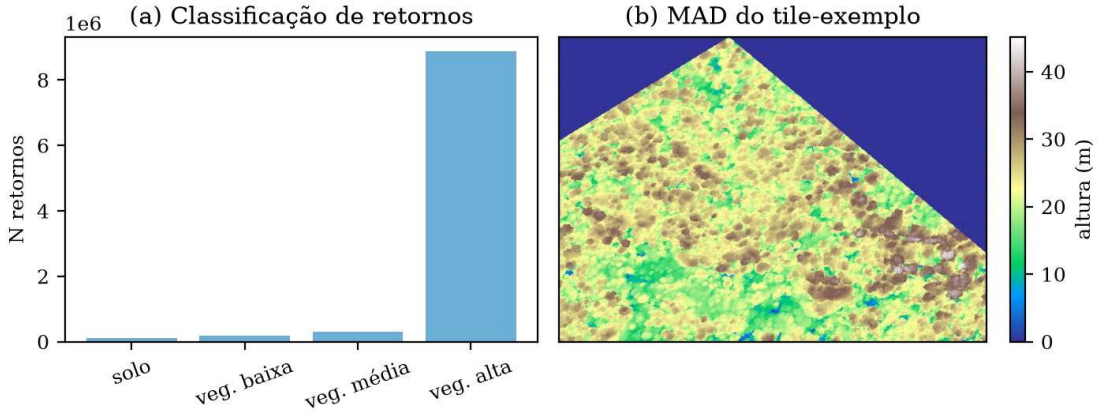


Figura 3 – Qualidade dos dados: (a) classificação dos retornos em estratos; (b) modelo de altura de dossel do tile-exemplo.

As métricas estruturais resultantes (Figura 4, Tabela 1) descrevem um dossel maduro e fechado, demonstrando que o fluxo recupera de forma consistente a estrutura da floresta. A reprodutibilidade e a dependência apenas de software de código aberto e dados públicos tornam a abordagem transferível a outros remanescentes do Nordeste.

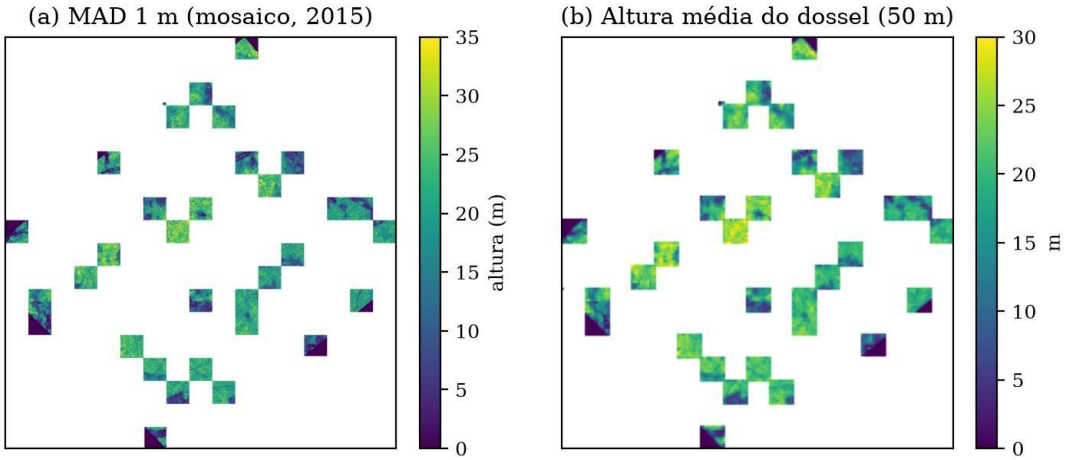


Figura 4 – Métricas estruturais derivadas: (a) MAD a 1 m; (b) altura média do dossel a 50 m.

Tabela 1 – Síntese das métricas estruturais e de carbono do sítio CON, agregadas sobre os tiles amostrais distribuídos pelo sítio.

Métrica	Valor
Altura média do dossel (m)	18,6
Mediana da altura (m)	19,3
Altura do topo, P95 (m)	29,0
Cobertura de dossel >5 m (%)	≈90
ACD média (kg C m^{-2})	12,6 ± 6,7

O fluxo de processamento aqui descrito gera produtos que podem ser diretamente empregados em estudos de gestão de água. Por exemplo, os mapas de altura de dossel e de cobertura florestal obtidos podem calibrar submodelos de interceptação e infiltração em modelos hidrológicos distribuídos. Considerando que a interceptação da precipitação depende da estrutura da copa, incorporar dados LiDAR melhora a acurácia de simulações de escoamento e recarga de aquíferos em bacias florestadas.

Do ponto de vista hidrológico, cada produto do fluxo tem significado funcional. O modelo de altura de dossel é um indicador de biomassa e de rugosidade aerodinâmica, que condiciona a partição de energia e a evapotranspiração; a cobertura e o perfil vertical de retornos aproximam a densidade e a distribuição da área foliar, determinantes da interceptação e da redistribuição da chuva em throughfall e escoamento pelo tronco; e a variabilidade espacial dessas métricas mapeia, indiretamente, a heterogeneidade da resposta hidrológica dentro da bacia. O mesmo conjunto de métricas que descreve a estrutura serve, assim, de insumo para a parametrização de modelos hidrológicos distribuídos.

A reprodutibilidade e uso de software livre enfatizadas no fluxo permitem ampla adoção em programas de monitoramento ambiental. Agências de recursos hídricos podem integrar estes procedimentos em rotinas anuais, alimentando bases de dados sobre cobertura arbórea e parâmetros hidrológicos. Em cenários de mudanças no uso do solo, atualizações LiDAR consecutivas podem, por exemplo, quantificar como desmatamentos ou restaurações alteram a capacidade de retenção de água da bacia.

Além disso, o pipeline facilita a construção de modelagens hidrológicas eco-fisiológicas. A coleta de variáveis como área foliar, altura do dossel e densidade da copa serve de entrada para modelos ecológicos acoplados, permitindo prever como alterações florestais impactam o balanço hídrico total. Essa abordagem integrada apoia a tomada de decisão sobre conservação de nascentes e reflorestamento, privilegiando áreas onde ganhos estruturais reflitam em maior benefício hídrico.

Ao disponibilizar métricas estruturais forestais detalhadas de forma aberta e replicável, o fluxo proposto constitui um recurso valioso para estudos de recursos hídricos. Ele possibilita desde a calibração de modelos de interceptação até análises de sensibilidade do regime hídrico a mudanças na vegetação, contribuindo para uma gestão hídrica mais embasada em evidências estruturais.

LIMITAÇÕES

A transferibilidade do fluxo a outros sítios depende, sobretudo, da disponibilidade de dados com densidade e classificação adequadas. A elevada densidade de pulsos (~65 pontos m^{-2}) e a classificação de retornos do sítio CON representam condição favorável; sítios com menor densidade exigiriam ajuste dos limiares de geração do MAD e da estimativa do terreno. Recomenda-se, como etapa seguinte, a validação das métricas contra parcelas de inventário e contra medições hidrológicas, interceptação e vazão de base, convertendo a caracterização estrutural em estimativas hidrológicas calibradas.

A demonstração apoia-se em recobrimento parcial do sítio; a caracterização completa requer o processamento de todos os tiles. As métricas estruturais são robustas, mas estimativas de carbono dependeriam de calibração por inventário, o que não foi realizado neste trabalho.

CONCLUSÕES

Demonstrou-se um fluxo de processamento reprodutível e de código aberto para a caracterização estrutural de florestas atlânticas a partir de LiDAR aerotransportado. Aplicado a um remanescente no sul da Bahia, o fluxo recuperou consistentemente a estrutura de um dossel maduro, evidenciando a viabilidade técnica da abordagem para o monitoramento de remanescentes atlânticos do Nordeste com dados públicos.

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

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.

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, p. 3177–3190, 2014.

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

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.