

CARACTERIZAÇÃO DE FLORESTA TROPICAL PRIMÁRIA COM USO DE LIDAR

Daniel de Almeida Papa¹, Danilo Roberti Alves de Almeida², Evandro Orfanó Figueiredo³, Marcus Vinício Neves d'Oliveira⁴, Renato Mesquita da Cunha⁵

¹Embrapa Acre, Rio Branco-AC, daniel.papa@embrapa.br

²Universidade de São Paulo - USP/ESALQ, daniloflorestas@gmail.com,

³Embrapa Acre, Rio Branco-AC, evandro.figueiredo@embrapa.br;

⁴Embrapa Acre, Rio Branco-AC, marcus.oliveira@embrapa.br;

⁵Universidade Federal do Acre, Rio Branco-AC, renato.cunha@ac.gov.br

RESUMO

O objetivo desse estudo é utilizar o sensor Lidar para caracterizar uma área de floresta tropical primária. O estudo foi realizado no Acre, em uma área com vegetação do tipo floresta aberta com palmeira, bambu e manchas de floresta densa. A coleta de dados Lidar foi feita com o sensor embarcado em uma aeronave, que sobrevoou uma área de 800 hectares, onde também foi realizado o censo das árvores com $DAP \geq 40$ cm. Foram feitas as análises de correlação, agrupamento e caracterização dos grupos. Como resultado, a altura média do dossel obtida pelo Lidar apresentou correlação de 0,74 com a área basal. Os grupos criados a partir da variável Lidar tiveram diferença significativa com os dados de campo, para quatro grupos: floresta densa com copas fechadas, floresta densa com abertura de dossel, floresta aberta com presença de árvores de grande porte e floresta aberta com ocorrência de bambu.

Palavras-chave — manejo florestal, Amazônia, modeflora.

ABSTRACT

The objective of this study is to use Lidar variables to characterize an area of primary tropical forest. The study was carried out in Acre, in an area with open forest type with palm tree, bamboo and spots of dense forest. The Lidar data collection was done with the sensor boarded in an aircraft, that flew an area of 800 hectares, where a census of trees with $DBH \geq 40$ cm was also carried out. The field data and Lidar were subjected to a correlation analysis, cluster analysis and cluster characterization. As a result, the mean canopy height obtained by Lidar presented a correlation of 0.74 with the variable basal area. The groups created from the Lidar variable had a significant difference with the field data for four groups: dense forest with closed canopies, dense forest with small gaps, open forest with large trees and open forest with bamboo.

Key words — forest management, Amazonia, modeflora.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização das florestas tropicais é uma etapa importante relacionada às atividades de manejo florestal sustentável, monitoramento do desmatamento e conservação dos recursos florestais [1].

Existem diversas metodologias de mapeamento e caracterização da vegetação, porém algumas delas, feitas a partir de imagens geradas por sensores orbitais, apresentam limitações em áreas de floresta densa e heterogêneas, como a floresta amazônica.

Uma alternativa para identificar pequenas variações na estrutura da vegetação, mesmo em situações complexas como na Amazônia, é o uso de sensores ativos como o Lidar (*Light detection and ranging*). Esse sensor, embarcado em uma aeronave, tem a capacidade de incidir em todo gradiente de altura e profundidade da paisagem florestal e captar informações, em três dimensões do espaço, relevantes para estudos de caracterização ecológica e estrutural da vegetação [2]. Todavia, os métodos de processamento e seleção de variáveis Lidar para o mapeamento florestal na Amazônia ainda carecem de estudos que avaliem com mais profundidade as relações entre as variáveis Lidar e os dados de campo nas diversas fisionomias existentes no bioma.

Nesse sentido, o nosso objetivo com esse estudo é testar diferentes variáveis obtidas com Lidar aerotransportado para caracterizar uma paisagem de floresta tropical primária na Amazônia ocidental.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no campo experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Acre, no município de Rio Branco (10° 01' 22" S, 67° 40' 3" W), localizada às margens da BR 364 (Figura 1).

A área florestal da propriedade tem 960 hectares, e nela foi realizado o inventário censitário em 800 ha. A vegetação predominante da região é do tipo floresta aberta, com palmeira, bambu e floresta densa. A hidrografia (Figura 1e) é caracterizada por uma rede de drenagens derivadas do igarapé Liberdade, que corta a propriedade no sentido sul/norte.

Estudos de campo feitos na área da Embrapa descrevem a ocorrência de três principais fisionomias da vegetação: floresta densa, floresta secundária e floresta aberta. A floresta densa ocorre em pequenas manchas de 1 a 5 hectares e tem como principal característica a ocorrência de árvores de grande porte, presença de dossel fechado e baixa densidade de vegetação no sub-bosque. Isso se dá pela baixa penetração de luz no interior da mata. Já nas áreas de floresta secundária, a vegetação tem porte médio a alto, com descontinuidade no dossel, entrada de luz indireta no interior da floresta e presença de palmeiras, cipós e bambus ocupando diferentes posições no estrato vertical da floresta. Já as áreas de floresta aberta são mais baixas, com distanciamento entre os indivíduos arbóreos de maior porte, entrada de luz direta no interior da floresta e presença dominante do bambu (*Guadua weberbaueri* Pilger) e lianas que se alastram impedindo a regeneração de indivíduos arbóreos e palmeiras (região centro-sul da área de estudo - Figura 1g).

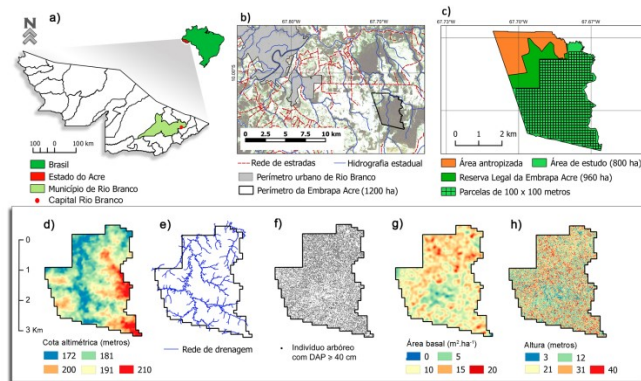


Figura 01: (a) Área de estudo, Acre; (b) região do entorno da área de estudo, Rio Branco, AC; (c) campo experimental da Embrapa Acre com grade de células; (d) modelo digital do terreno (MDT) com resolução de 1 metro; (e) rede hidrográfica; (f) inventário florestal censitário de 25.957 indivíduos; (g) distribuição da área basal de indivíduos com DAP \geq 40 cm; (h) modelo de altura do dossel (MAD) em resolução de 2 metros.

2.1. Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada em duas etapas: inventário florestal censitário de campo e sobrevoo Lidar aerotransportado (ALS). O inventário florestal de campo foi realizado em 800 hectares, entre junho de 2014 e janeiro de 2015. No censo, foi tomado o CAP, circunferência a 1,30 metro de altura do solo, de 22.957 indivíduos arbóreos com DAP \geq 40 cm. Cada árvore recebeu uma placa numérica referencial, foi georreferenciada com receptor GNSS de navegação, modelo Garmin 76 CSx e teve sua área seccional calculada a partir da circunferência medida em campo. A área basal por hectare foi obtida pela soma das áreas seccionais

dos indivíduos contidos nas células de 100 x 100 metros (1 hectare).

O sobrevoo com o sensor Lidar foi realizado em 2015, logo após o término do inventário. Foi utilizada uma aeronave CESSNA, modelo 206, equipada com sensor Lidar Harrier 68i da Trimble, na frequência de operação de 300 kHz, ângulo de escaneamento de até 22° e *footprint* de 30 cm. A densidade média de retornos foi de 14 pts.m², com número de retornos superior a 4 pts.m² em 98,8% da área e precisão horizontal de \pm 0,2 cm e, vertical de \pm 0,45 cm. A velocidade média do avião foi de 200 km/h, a uma altura de 600 metros e com largura de faixa de aproximadamente 490 metros.

2.2. Processamento dos dados

O perfilamento ALS gerou 169 milhões de pontos, sendo que, deste total, 37 milhões foram classificados como pontos de solo via algoritmo de interpolação pelo método de predição linear SCOP [3]. A partir dos pontos de solo, com densidade média de 0,43 pts.m², foi produzido o modelo digital do terreno (MDT), com resolução de 1x1 metro, utilizando-se do método de interpolação pelo vizinho mais próximo, com ponderação pelo inverso da distância, implementado em ambiente R pelo pacote “lidR” [4]. Em seguida, foi feita a normalização da nuvem de pontos Lidar, pela diferença entre a cota de elevação do MDT e o valor de altura de cada ponto da nuvem [4].

Foi executado um algoritmo de filtro de retornos espúrios na nuvem normalizada, com retornos com altura negativa e que não representam a vegetação, como pássaros e retornos aleatórios que se dão na atmosfera. O filtro foi checado a partir de uma análise visual da nuvem normalizada. O modelo de altura do dossel (MAD) foi calculado pelos pontos máximos da nuvem normalizada e filtrada numa resolução de 2x2 metros.

Para a geração de métricas Lidar, foram utilizados o MAD e a densidade de retornos Lidar distribuídos de um em um metro, pelo perfil vertical da altura da floresta. A partir do MAD foram extraídos os seguintes atributos estruturais do dossel, dentro de cada parcela: (i) altura média do dossel (Alt_{md}) (média do MAD); (ii) rugosidade (desvio padrão do MAD); e (iii) abertura do dossel ($Abert_{dossel}$) (fração do MAD abaixo do limite de 15 metros). A partir do número de retornos Lidar no gradiente de altura da floresta foi possível estabelecer dois atributos associados à densidade da vegetação: (iv) Índice de Área Foliar - LAI (soma do perfil do LAD - Densidade de Área Foliar), e (v) Densidade de Área Foliar do sub-bosque - LAD_{sub} (soma do LAD entre 5 e 12 metros). Esse procedimento foi feito a partir de células tridimensionais (*voxels*), com resolução horizontal (x e y) de 2 m² e resolução vertical (z) de 1 metro, com as quais foi possível estimar a variação volumétrica da densidade da vegetação (LAD) pela equação de *McArthur and Horn* [5];[6].

2.3 Análise de dados

A análise dos dados foi composta por quatro etapas: (i) criação da grade de células e estimativa dos atributos estruturais derivados do inventário de campo e da nuvem de retornos ALS; (ii) correlação entre os atributos do dossel (derivados do ALS) com o atributo de interesse (área basal); (iii) análise de agrupamentos para formação de grupos da vegetação; e (iv) validação e caracterização dos grupos da vegetação.

Na primeira etapa, a área de estudo foi dividida em células de 100 x 100 metros (1 ha), totalizando 723 hectares. Para cada célula foram calculados o atributo de campo (área basal) e os atributos estruturais do dossel. Em seguida, foi realizada análise de correlação de Pearson, para selecionar o atributo estrutural do dossel utilizado na formação de grupos homogêneos da vegetação. Para isso foi realizada uma análise de agrupamento hierárquico (método de Ward) [7], agregando as células com maior similaridade, tendo como referência apenas um atributo do dossel. O número de grupos foi estabelecido pelo método de Elbow [8]. A qualidade do agrupamento foi verificada a partir do índice de correlação cofenética, e a consistência dos grupos, pelo *scree plot* [7] e dendrograma [8].

A validação dos estratos (grupos) foi feita a partir de um teste de ANOVA *posthoc Tukey* (R CORE TEAM, 2018), tendo como variável preditora os estratos e como variável resposta a área basal; e a caracterização dos grupos foi realizada por análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) [9];[10] utilizando-se das variáveis Lidar geradas no processamento.

3. RESULTADOS

O levantamento censitário identificou aproximadamente 235 espécies arbóreas de 65 famílias botânicas diferentes, totalizando um volume médio de 130 m³.ha⁻¹, abundância média de 32 indivíduos por hectare (ind.ha⁻¹) e área basal média de 10 m².ha⁻¹ – referente aos indivíduos com diâmetro a partir de 40 cm, e a 1,30 metro de altura do solo (DAP).

Para a etapa de agrupamento da vegetação foi selecionado o atributo estrutural Altura Média do Dossel (Alt_{md}), por ter o maior valor de correlação com a área basal de campo ($r = 0,74$). O índice de correlação cofenética resultante da análise de agrupamento com essa variável foi de 0,59, o *scree plot* indicou o número ideal de grupos como sendo $k = 4$ (Figura 2) e a análise do dendrograma também corroborou para esse resultado (Figura 3). A distribuição geográfica das células por grupo está apresentada na figura 4.

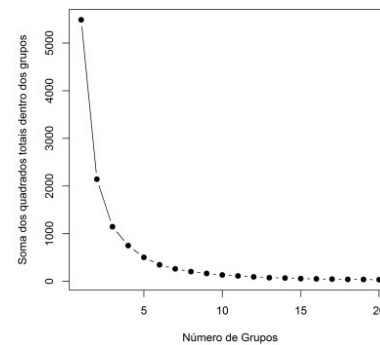


Figura 2: *Scree plot* feito com 723 células para k até 20.

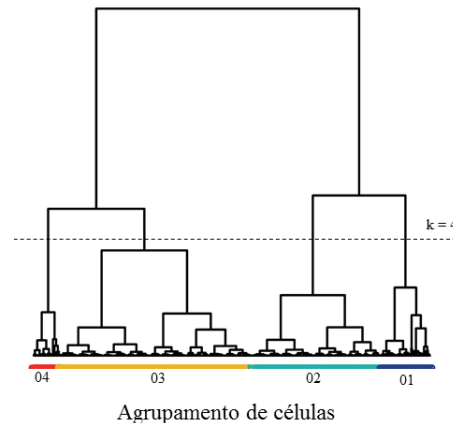


Figura 3: Dendrograma gerado pelo método de Ward.

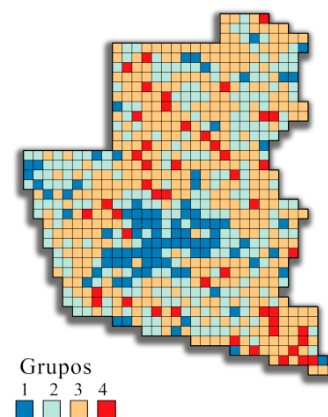


Figura 4: Mapa das células de 1ha classificadas por grupo

Das 723 células, 89 foram classificadas como do grupo 01 (12%), 235 do grupo 02 (32%), 351 do grupo 03 (48%) e 48 do grupo 04 (6%) (Figura 05). Os valores médios das variáveis Lidar por grupo foram apresentadas na tabela 01.

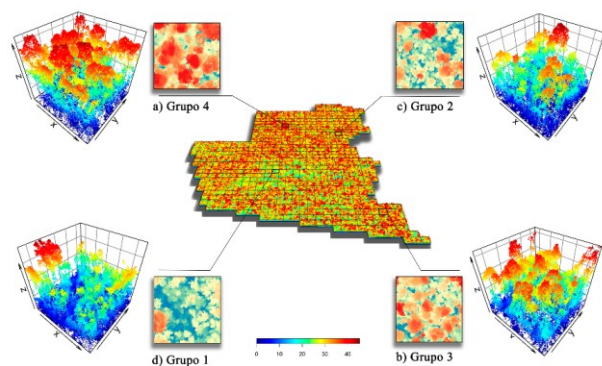


Figura 05: Ilustração tridimensional de uma amostra média de cada um dos quatro grupos classificados na análise de agrupamento.

Tabela 01: Sumário estatístico dos atributos da vegetação para os quatro estratos. LAI (índice de área foliar em $m^2 \cdot m^{-2}$).

Variáveis de campo e Lidar	Valores médios de cada grupo			
	1	2	3	4
Área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	5,92	8,97	11,26	14,58
Altura média do dossel (metros)	19,2	22,52	25,48	29,24
Rugosidade (metros)	8,68	8,86	8,83	8,87
LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$)	1,72	1,97	2,21	2,43
LAI sub-bosque ($m^2 \cdot m^{-2}$)	0,57	0,44	0,35	0,28
Abertura dossel (%)	0,35	0,22	0,14	0,08

4. DISCUSSÃO

O critério de *Elbow* mostrou ser eficiente para determinar número de estratos ($k = 4$), pois os quatro grupos foram diferentes significativamente quanto à área basal. Contudo, o potencial de estratificação da área basal utilizando a métrica Lidar Alt_{md} foi ainda maior.

A correlação entre a média da altura do dossel (Alt_{md}) e área basal a nível de parcela pode ser explicada pela sensibilidade do Lidar em captar a altura das árvores dominantes e co-dominantes que ocupam o dossel da floresta e que se relacionam positivamente com diâmetro de caule e área basal [11];[12]

Neste estudo, a utilização da altura média do dossel para o agrupamento foi eficiente para ordenar outros parâmetros estruturais do dossel (Tabela 01). Florestas com menor altura possuem maior abertura de dossel e, conseqüentemente, maior densidade de vegetação do sub-bosque (LAI_{sub}). A rugosidade do dossel foi relativamente alta (~ 9 metros) em todos os estratos, portanto, não serve como um bom parâmetro de caracterização neste tipo de floresta. Essa variação da altura do dossel pode ser explicada pela natureza do tipo de floresta estudada, que é predominantemente aberta, intercalada com aglomerados de árvores dominantes, clareiras de tamanhos e estágios de sucessão diferentes e ocorrência de lianas e bambu em áreas com maior incidência de luz. Os quatro grupos discriminados pelo Lidar e validados

com os dados censitários de campo foram: floresta aberta com bambu (Grupo 01), floresta aberta com presença de árvores de médio e grande porte (Grupo 02), floresta densa com presença de clareiras (Grupo 03) e floresta densa com dossel fechado (Grupo 04).

5. CONCLUSÕES

A altura média do dossel da floresta, obtida a partir do sobrevoio com sensor Lidar, foi boa preditora da variação da área basal das árvores com potencial madeireiro ($DAP \geq 40cm$) em florestas primárias do tipo aberta com palmeira, bambu e manchas de floresta densa. As variáveis abertura do dossel, LAI e LAI de sub-bosque refletiram bem a variação estrutural da floresta.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Braz, M. E.; Figueiredo, E. O.; D'Oliveira, M. V. N.; Passos, C. A. M. "Manejo florestal de precisão: modelo digital de exploração e manejo de florestas naturais". In: Figueiredo, E. O.; Braz, E. M.; Oliveira, M. V. N. d' (Ed.). Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, p. 17-29, 2007.
- [2] D'Oliveira, M. V. N de; Figueiredo, E. O.; Papa, D. A. de. "Uso do Lidar como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais". Brasília, DF:Embrapa, 2014. 130 p.
- [3] Trimble, G.; Geo, T. W. Scop++ Manual for Version 5.5 and higher, 2014.
- [4] Roussel, J.R.; Auty, D. lidR: airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications, 2018.
- [5] Almeida, D. R. A. de; Nelson, B. W.; Schiatti, J.; Gorgens, E. B.; Resende, A. F.; Stark, S. C.; Valbuena, R. "Contrasting fire damage and fire susceptibility between seasonally flooded forest and upland forest in the Central Amazon using portable profiling LIDAR". *Remote Sensing of Environment*, Nova York, v. 184, p. 153-160, out. 2016.
- [6] Asner, G. P.; Mascaro, J.; Muller-landau, H.C.; Vieilledent, G.; Vaudry, R.; Rosamoelina, M.; Hall, J.S.; Van breugel, M., "A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping". *Oecologia*, v. 168, n. 4, p. 1147-1160, 2012.
- [7] Manly, B.F.J., Métodos estatísticos multivariados: uma introdução / Bryan F.J. Manly; tradução Sara Ianda Carmona. – 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 229p., 2008.
- [8] Tipton, E. "Stratified sampling using cluster analysis: a sample selection strategy for improved generalizations from experiments". *Evaluation Review*, v. 37, n. 2, p. 109-139, abr. 2013.
- [9] R core team. R: A language and environment for statistical computing Vienna, Austria, 2018.
- [10] Kassambara, A.; Mundt, F. "Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analysis", 2017.
- [11] Asner, G. P.; Palace, M.; Keller, M.; Pereira Júnior, R.; Silva, J. N. M.; Zweede, J. C. "Estimating canopy structure in an Amazon Forest from laser range finder and IKONOS satellite observations". *Biotropica*, v. 34, n. 4, p. 483-492, 2002.
- [12] Sullivan, F. B.; Ducey, M. J.; Orwig, D. A.; Cook, B.; Palace, M. W. Comparison of lidar- and allometry-derived canopy height models in an eastern deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, v. 406, n. p. 83-94, dez. 2017.