

Uso do LiDAR para quantificação da perda de biomassa produzida pelo corte de árvores e extração das toras em uma floresta tropical manejada no Estado do Acre

Alisson Maia de Queiroz¹
 Marcus Vinicio Neves d'Oliveira²
 Luis Claudio Oliveira³
 Evandro Orfanó Figueiredo⁴

¹ Universidade Federal do Acre – UFAC
 Caixa Postal 500 - 69.915-900 – Rio Branco – AC, Brasil.
 alisson.florestal@gmail.com

^{2 3 4} Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA ACRE
 Caixa Postal 321- 69.900-970 - Rio Branco – AC, Brasil.
 marcus.oliveira@embrapa.br
 luis.oliveira@embrapa.br
 evandro.figueiredo@embrapa.br

Abstract: Monitoring forest operations on logged areas is essential to identify the impacts caused to the residual. Light Detection and Ranging (LiDAR) has proven an effective tool to the quantification of the structural parameters and biomass loss on tropical forests. The objective of this study was through the use of repeated LiDAR flights to elaborate a regression model to estimate the biomass of the logged trees and to assess the biomass losses produced by tree cutting and logs extraction in a forest management area. The study was carried out in an annual production area in the Antimary state forest in Acre State, western Amazon. The results demonstrated that: i. the use of crown projection area as independent variable was sufficient to produce a robust model to estimate the biomass of individual trees; ii. the number of trees extracted alone did not explained the biomass loss in the plots and iii. there was a strong relationship between the total biomass loss estimated by the subtraction of the biomass before and after logging and the biomass of the extracted trees. We suggest that this relationship should be used as a quality indicator of the applied forest management techniques.

Keywords: laser scanning, logging damage, forest structure, forest management, varredura a laser, danos na exploração madeireira, estrutura florestal, manejo florestal.

1. Introdução

O corte de árvores resulta em perdas substanciais de carbono em florestas tropicais, portanto se faz necessário realizar o monitoramento dos danos estruturais do dossel e pesquisas para melhorar as estimativas de biomassa em formações florestais manejadas (SOUZA JUNIOR e BARRETO 2000; NOGUEIRA et al. 2008).

Os sensores tridimensionais que se baseiam no uso de radar e de laser têm despertado atenção, para a detecção de mudanças na floresta, pois uma das características desses sensores é a sua capacidade de penetrar verticalmente por pequenas aberturas no dossel para recolher informações dos diferentes estratos da vegetação permitindo a análise dos parâmetros estruturais da floresta e também do relevo existente nessas áreas (GORGENS et al.; 2016). No meio florestal, a tecnologia *Light Detection And Ranging* (LiDAR) vem sendo utilizada na estimativa de diversas variáveis, tais como: altura, volume, biomassa, área basal, variáveis morfológicas de árvores individuais, material combustível, e outros elementos importantes para o manejo de florestas (GIONDO et al., 2010; NASSET e GOBAKKEN, 2005; MACEDO, 2009). A varredura a laser também tem sido amplamente estudada para apoiar a identificação das alterações ocorridas na floresta podendo ser aplicada para monitorar árvores colhidas e caídas, florestas em crescimento e mudanças na vegetação (YU et al. 2004).

O objetivo desse trabalho foi utilizar voos LiDAR repetidos para: i. Desenvolver um modelo de regressão para estimativa de biomassa de árvores individuais; ii. avaliar as perdas de biomassa produzidas pela exploração florestal, considerando três intensidades de

exploração diferentes e iii. verificar se existe correlação entre a perda de biomassa e a quantidade de árvores cortadas por hectare.

2. Material e Método

2.1. Area de Estudo

A Floresta Estadual do Antimary-FEA (Figura 1), foi constituída legalmente através do Decreto de criação nº 046 de 07 de fevereiro de 1997 com área total de 57.629,00 (cinquenta e sete mil, seiscentos e vinte e nove) hectares. Está localizada nos municípios de Bujari e Sena Madureira na região centro-leste do Estado do Acre. Situa-se entre os paralelos 09°13' e 09°31' de latitude Sul e entre os meridianos de 68°01' e 68°23' de longitude Oeste de Greenwich. A área de estudo é parte de uma unidade de produção anual (UPA), possui 1000 ha explorados em 2010 e 2011. O planejamento e execução da exploração foram feitos seguindo a metodologia Modeflora desenvolvido por (FIGUEIREDO et al., 2007).

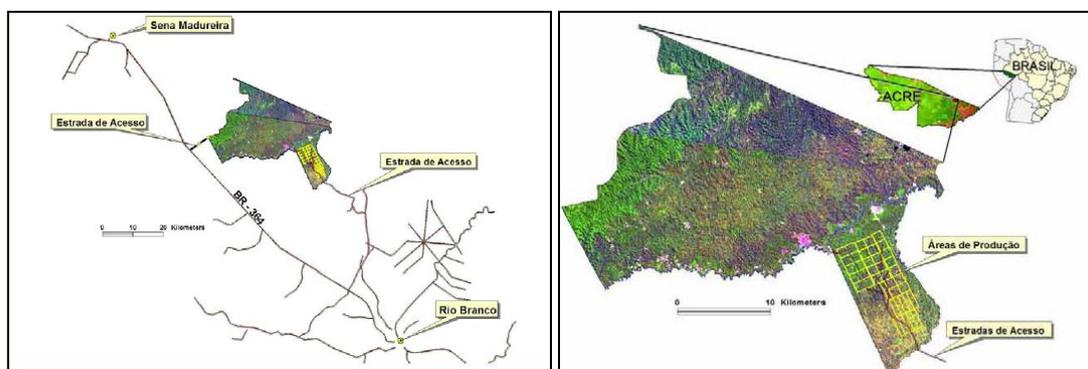


Figura 1 - Localização da Floresta Estadual do Antimary (Fonte: Fundação de Tecnologia do Estado do Acre – FUNTAC, 2002).

2.2. Dados LiDAR

Sobre a área de estudo foram executados dois voos LiDAR, o primeiro ocorreu no início do corte de árvores e arraste de toras em 2010 e o segundo imediatamente após o fim dessas atividades em 2011. As especificações técnicas do voo foram as seguintes: Sensor LiDAR Optech ALTM 3100EA; altitude de 500 m voando acima do solo; taxa de varrimento de 70 Hz; densidade de pontos (25 pulsos / m²). (D'OLIVEIRA et al.; 2012). O processamento dos dados LiDAR foi feito com os softwares Fusion (McGaughey, 2008) e ArcGis 10.0. A partir dos dados brutos LiDAR foram criados: i. modelo digital do terreno (MDT); ii. modelo de altura de dossel (CHM); iii. modelo de densidade relativa da vegetação (RDM) e iv. modelo de biomassa seca acima do solo (D'OLIVEIRA et al, 2012, 2014; ANDERSEN et al 2014).

2.3. Seleção das Amostras

Neste trabalho foi utilizada a base de dados de inventário florestal de Figueiredo et al. (2014), composta por dados de campo (DAP e localização geográfica das árvores cortadas) e dados lidar (morfometria de copa). Para a seleção das amostras a área foi dividida em um gride de 100 x 100 metros, onde foi feita a interseção com a posição das árvores disponíveis na base de dados, tornando possível a identificação do número de árvores exploradas em cada parcela (Figura 2). Ao todo foram selecionadas 31 amostras LiDAR de um hectare contendo 51 árvores cortadas distribuídas da seguinte forma:

- Em 16 parcelas foi cortada apenas uma árvore;
- Em 10 parcelas foram cortada 2 árvores;

- Em 5 parcelas foram cortadas 3 árvores.

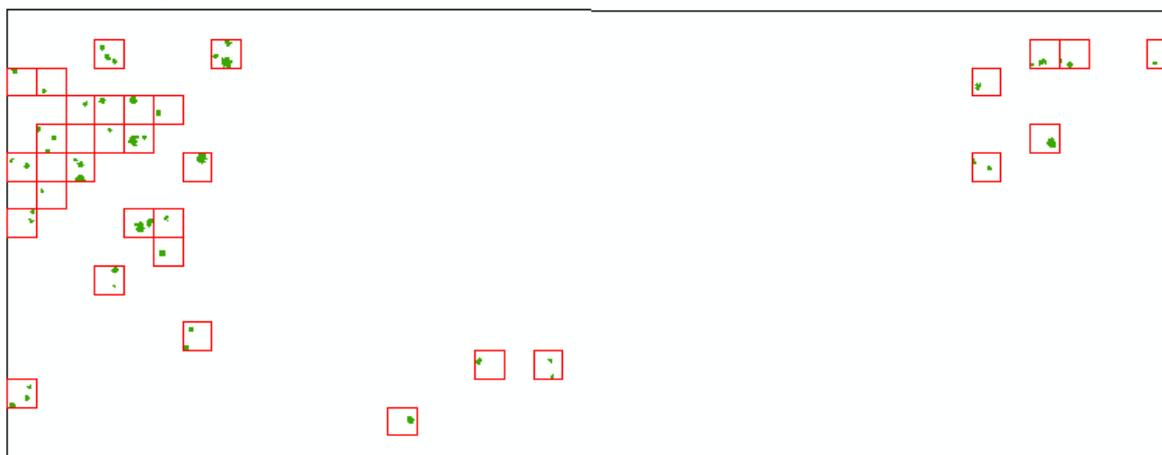


Figura 2 – Distribuição das parcelas com a representação das copas das árvores extraídas

A posição das árvores cortadas foi validada pela subtração dos modelos de altura de dossel das amostras de dados LiDAR de 2010 e de 2012, que possibilita a identificação das copas das árvores removidas dentro das parcelas selecionadas, presentes no primeiro voo e ausentes no segundo (Figura 3).

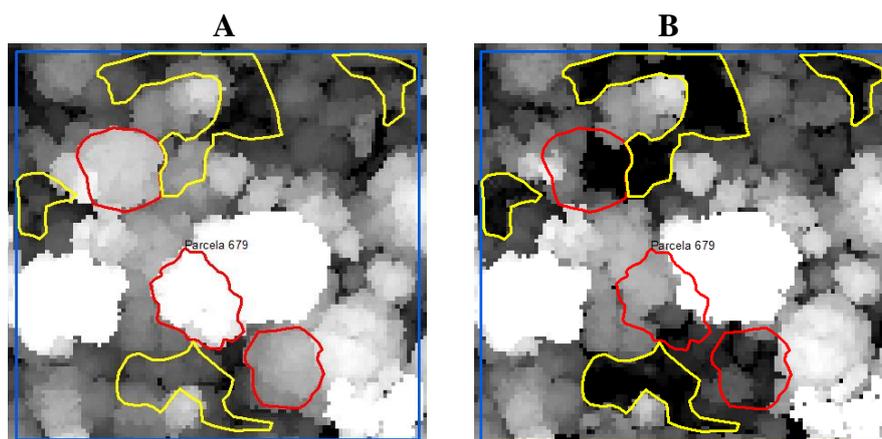


Figura 3 – Comparação do modelo de altura de dossel em 2010 (A) e em 2012 (B) representando as árvores extraídas (vermelho) e os danos (amarelo) causados pela exploração dentro da parcela.

2.4. Estimativa da perda de biomassa seca acima do solo pelo corte e arraste das árvores

A perda de biomassa nas parcelas pelo corte e arraste das árvores foi estimada tendo como base dados de campo e LiDAR. A biomassa seca acima do solo (BSA_{AR}), das árvores exploradas foi estimada por meio da equação alométrica desenvolvida por Nogueira et al. (2008), com DAP das árvores coletados em campo (Equação 1).

$$BSA_{AR} = (EXP (-1,716+2.413 * Ln (DAP))/1000 \quad (1)$$

Onde:

BSA_{AR} : Biomassa real da árvore cortada;

EXP: Exponencial;

Ln: Logaritmo neperiano;

DAP: Diâmetro a 1,30 m do solo.

Para a estimativa da biomassa das árvores individuais extraídas, utilizando os dados LiDAR, foi desenvolvido um modelo de regressão linear múltipla para estabelecer a relação entre a biomassa observada e variáveis morfométricas de copa e métricas LiDAR. Variáveis de predição LiDAR foram selecionadas por meio do pacote SAS.

A biomassa seca acima do solo (BSA_P Mg. ha^{-1}) das parcelas selecionadas, calculada a partir da nuvem de pontos LiDAR foi estimada por meio da aplicação do modelo desenvolvido por d'Oliveira et al. (2012) desenvolvido na mesma área (Equação 2) às métricas dos dados brutos LiDAR.

$$BSA_P = (3.119 + 0.564 P25 + 0.062 Var)^2 + 1.74 \quad (2)$$

Onde:

BSA_P : Biomassa seca acima do solo na parcela;

P25: elevação média dos retornos no primeiro quartil das amostras LiDAR.

VAR: variância da elevação dos retornos das amostras LiDAR.

A biomassa das árvores extraídas foi calculada pela soma da biomassa das árvores individuais cortadas dentro da parcela, estimada pelo DAP medido em campo (biomassa observada) e pelo modelo LiDAR (biomassa prevista). As métricas do LiDAR permitiram a estimativa da biomassa nas parcelas antes e depois da exploração, indicando assim a perda total de biomassa. Essa perda total inclui a perda pela extração e também a perda causada pelos danos da abertura de clareiras e construção da infraestrutura de exploração.

3. Resultados e Discussão

3.1. Modelo de regressão baseado em dados LiDAR para biomassa de árvores individuais

O melhor modelo obtido para estimar a biomassa de árvores individuais a partir de dados LiDAR utilizou apenas a área de projeção das copas como variável independente. O modelo apresentou elevado coeficiente de correlação ($R^2_{adj.} = 0,71$; $N=52$; $F=123,24$; $p < 0,001$). Essa alta correlação poderia ainda ser maior não fosse a grande variação na relação área de copa e biomassa observada em florestas tropicais e árvores com copas danificadas por causas naturais ou não, que afetam as métricas dos dados LiDAR. Apesar disso, podemos considerá-lo aceitável para efeito de comparação dado a elevada significância das variáveis utilizadas na regressão (Figura 4).

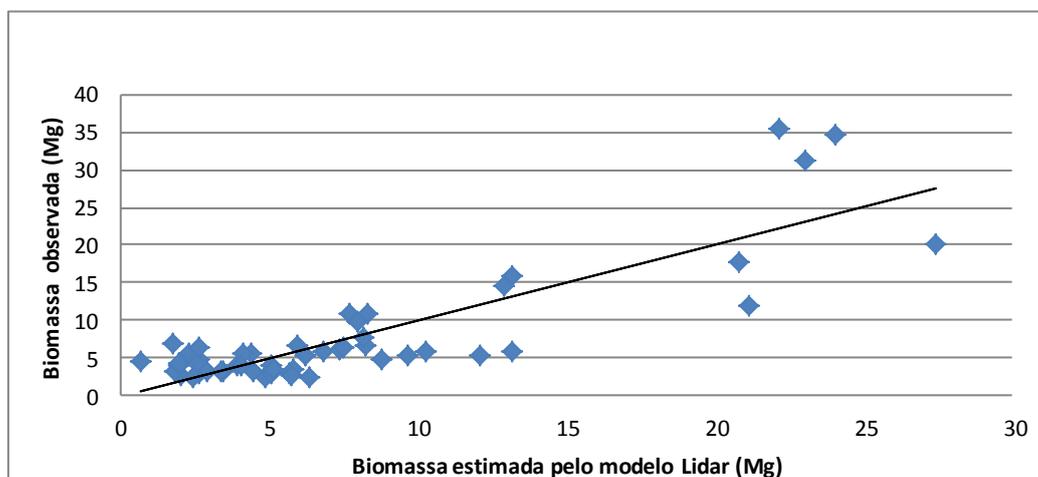


Figura 4 – Biomassa observada (inventário florestal) versus prevista (modelo Lidar) pela equação: $-1,87 + 0,02676 \text{ APC}$ ($R^2_{\text{adj}}=0,71$; $N=52$; $p<0,001$) onde: APC - área de projeção da copa), das árvores cortadas dentro das áreas selecionadas para o estudo na UPA 2009 da floresta estadual do Antimary.

3.2. Modelo de regressão de biomassa extraída observada e baseado em dados LiDAR e o número de árvores cortadas nas parcelas

O modelo de regressão relacionando o número de árvores cortadas e a biomassa das árvores extraídas (calculada pela soma da biomassa das árvores individuais cortadas dentro da parcela) apresentou baixo coeficiente de determinação ($R^2_{\text{adj}} = 0,13$) (Figura 5a). Esse resultado é bastante esperado pela grande variação do diâmetro das árvores cortadas (de 50,5 a 156,5 cm) fazendo com que uma única árvore de grande porte equivalha à soma da biomassa de várias árvores pequenas. Apesar dessa relação óbvia, parte da legislação florestal brasileira ainda é baseada em número de árvores cortadas para definição de intensidade corte nos planos de manejo florestal. Quando a mesma comparação é feita com a biomassa das árvores individuais das parcelas estimada pelas métricas do LiDAR essa correlação também foi baixa (Figura 5b).

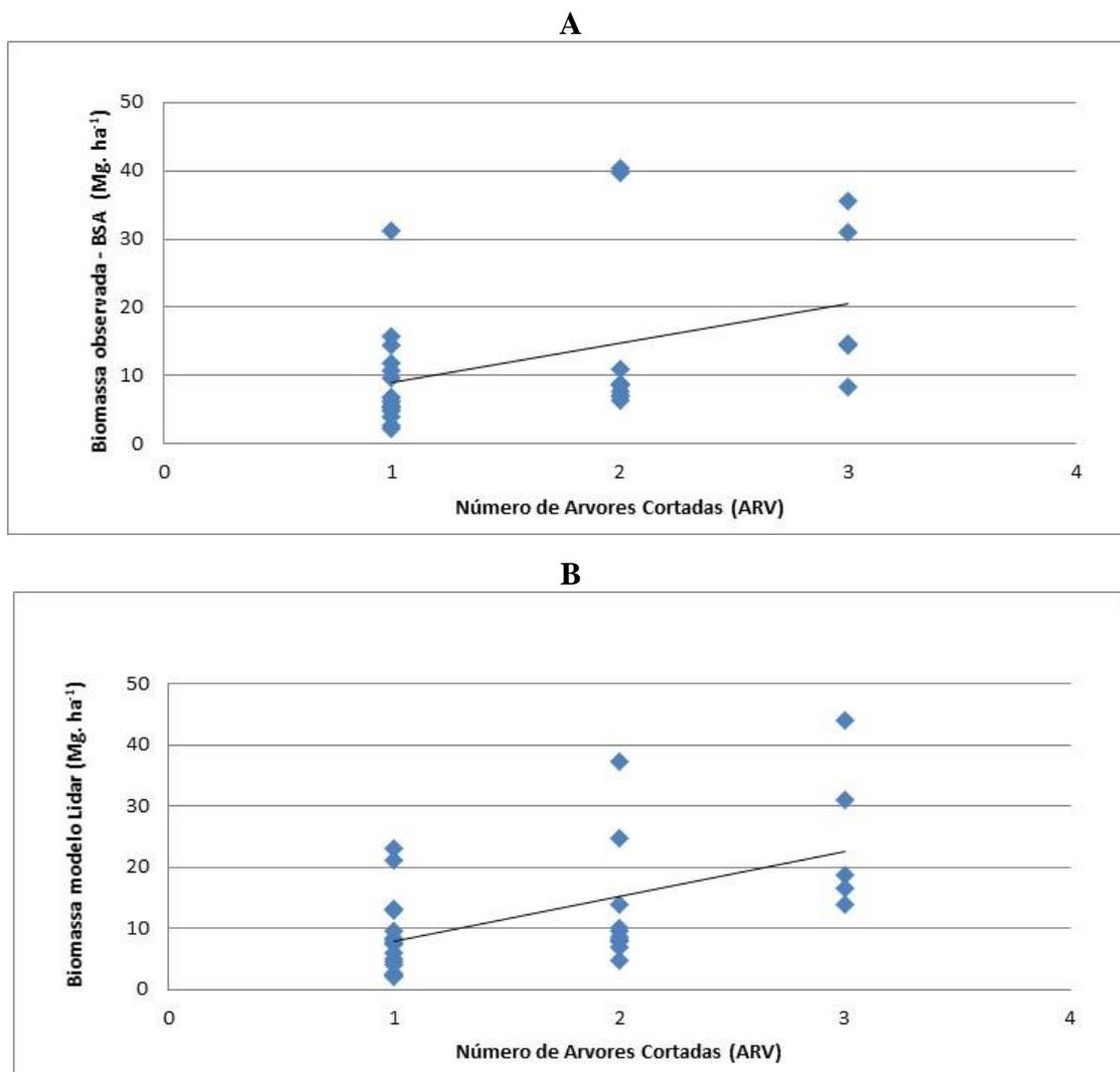


Figura 5 – Modelos de regressão para biomassa observado (A – $BSA = 3,07 + 5,82 \text{ ARV}$; $R^2(\text{adj.})=0,13$; $p<0,024$) e o estimado pelo modelo LiDAR (B – $BSA = 0,57 + 7,35 \text{ ARV}$; $R^2(\text{adj.})=0,27$; $p<0,002$) das árvores extraídas nas parcelas e o número de árvores cortadas dentro das parcelas selecionadas para o estudo na UPA 2009 da floresta estadual do Antimary.

3.3. Modelo de regressão de biomassa extraída observada e estimado por meio de dados LiDAR e a subtração da biomassa antes e após a exploração estimada pelo modelo geral de biomassa (d'Oliveira, 2012).

Foi verificada uma elevada correlação entre a soma das biomassas observada das árvores extraídas nas parcelas e a perda total de biomassa calculada pela diferença da biomassa antes e após a exploração estimada pelo modelo lidar ($R^2(\text{adj.}) = 0,53$). Apesar de que a validação do modelo em campo não foi possível pela ausência de dados de campo para danos produzidos pela exploração, os resultados reforçam a tese defendida por vários autores (ex. Pereira et al., 2002), de que os danos causados pela abertura de pátios, trilhas e pela queda das árvores, estão intimamente relacionados com o volume e biomassa das árvores que são cortadas e removidas (Figura 6a). Quando a regressão foi feita utilizando a biomassa das árvores extraídas estimada pelas métricas do LiDAR, o coeficiente de determinação ajustado ($R^2(\text{adj.}) = 0,53$) foi similar.

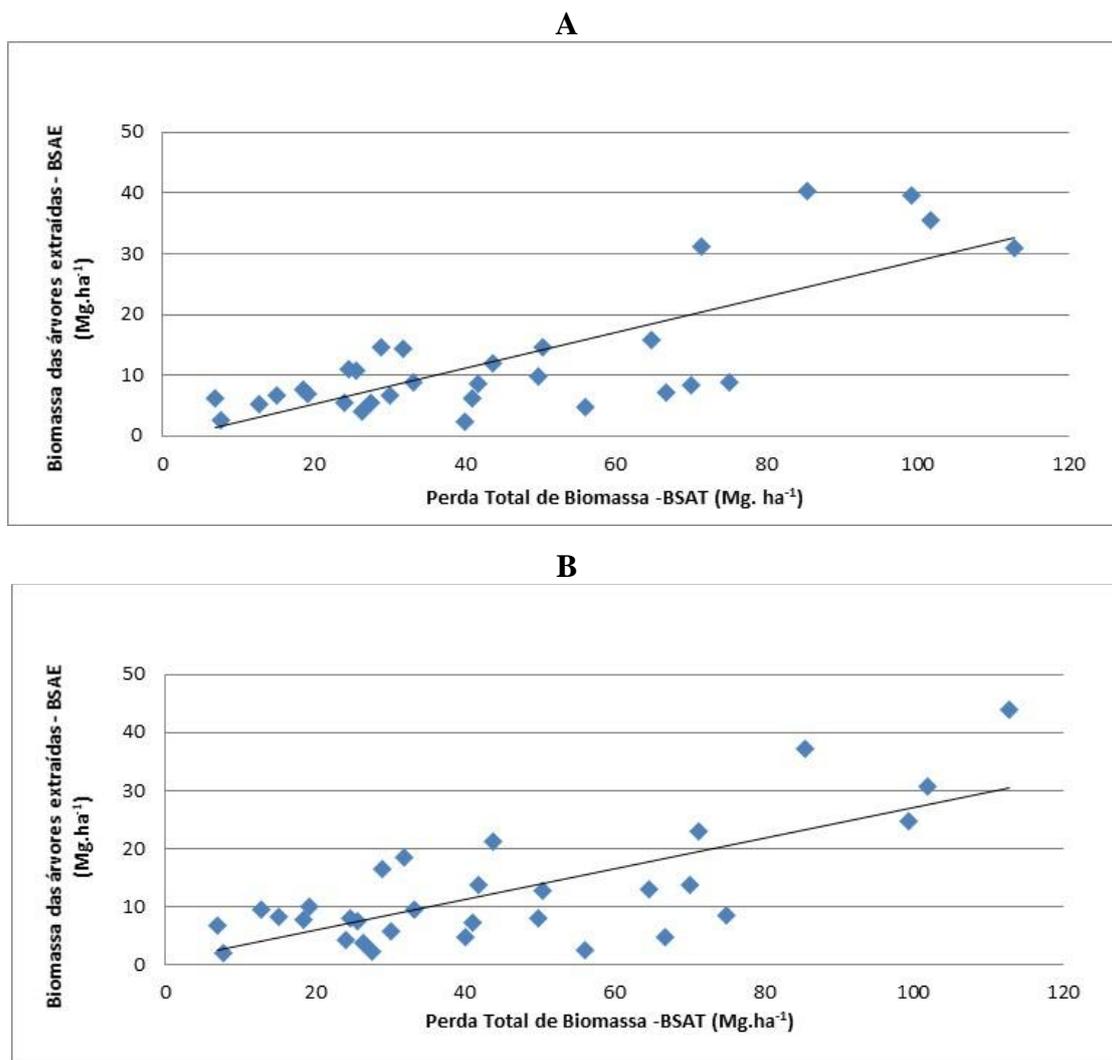


Figura 6 – Modelo de regressão entre a biomassa extraída (BSAE) observada (A – $BSAT = 0,68 + 0,2644 BSAE$; $R^2(\text{adj.})=0,53$; $N=31$; $p<0,0001$) e estimada pelo lidar (B – $BSAT = 0,72 + 0,2953 BSAE$; $R^2(\text{adj.})=0,53$; $N=31$; $p<0,0001$) e a perda total de biomassa (BSAT) calculada pela diferença da biomassa estimada pelo modelo LiDAR (d’Oliveira, et al., 2012) antes (2010) e após (2012) a exploração nas parcelas selecionadas para o estudo na UPA 2009 da floresta estadual do Antimary.

4. CONCLUSÕES

- A equação gerada para estimar a biomassa das árvores extraídas utilizando variáveis morfométricas de copa e as métricas do LiDAR apresentou alta correlação com a biomassa observada. Isso reforça o potencial do uso de dados LiDAR não apenas para gerar informações estruturais em florestas tropicais, mas também estimar estoques de volume e biomassa de árvores individuais.
- A baixa correlação entre número de árvores cortadas e a soma da biomassa das árvores extraídas na parcela, demonstra a limitação de utilizar apenas o número de árvores exploradas por hectare para determinar intensidade de corte em florestas manejadas.
- A alta correlação entre a biomassa das árvores extraídas e a perda total de biomassa na parcela corrobora com a tese de que existe uma relação ótima entre biomassa extraída e danificada que pode ser usada como indicador da qualidade para as técnicas de manejo aplicado a floresta.

5. REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, H. E.; REUTEBUCH, S.E.; MCGAUGHEY, R. J.; D' OLIVEIRA, M.V.N.; KELLER, M. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. **Remote Sensing of Environment**, 151, p. 157–165, 2014.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; REUTEBUCH, S. E.; McGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H. E. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 479-491, 2012.
- D'OLIVEIRA, M. V. N.; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. de O. **Uso do Lidar como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 131p
- 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, 2007. 183p
- FIGUEIREDO, E. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; FEARNSTIDE, P. M.; PAPA, D. A. Modelos para estimativa de volume de arvores individuais pela morfometria da copa obtida com LIDAR. **Cerne**, vol. 20, núm. 4, p. 621-628, 2014.
- GIONDO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.
- GORGENS, E. B.; SOARES, C. P. B.; NUNES, M. H.; RODRIGUES, L. C. E. Characterization of Brazilian forest types utilizing canopy height profiles derived from airborne laser scanning. **Applied Vegetation Science**. Vol. 19, Issue 3. p. 369–552, 2016.
- MACEDO, R. D. C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de Eucalyptus sp. através de laserscanner aerotransportado**. 2009. 143 f. (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2009.
- NASSET, E.; GOBARKEN, T. Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, n. 3-4, p. 453-465, 2005.
- NOGUEIRA, E.M.; FEARNSTIDE, P.M.; NELSON, B.W.; BARBOSA, R.I.; KEIZER, E.W.H. Estimativas de biomassa florestal na Amazônia brasileira: Novas equações alométricas e ajustes para biomassa a partir dos inventários de volume de madeira. **Floresta Ecologia e Gestão**. 2008. v. 256 p. 1853-1867.
- PEREIRA, R., ZWEEDE, J. C., ASNER, G. P., KELLER, M. M. Forest canopy damage and recovery in reduced impact and conventional selective logging in Eastern Para, Brazil, **Forest Ecology and Management**, v 168, 77- 89, 2002.
- SOUZA JUNIOR, C.; BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, 21, pp. 173–179, 2000
- YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 4, p. 451-462, 2004.