

Estimativa de biomassa acima do solo para uma área queimada e uma área de corte seletivo no município de Feliz Natal – MT por meio de dados LiDAR

Erone Ghizoni dos Santos¹
Anderson Jorge¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Fabio Guimarães Gonçalves²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja, São José dos Campos - SP 12227-010 Brasil
{anderson.jorge, erone.santos}@inpe.br; yosio@dsr.inpe.br

²Canopy Remote Sensing Solutions
Florianópolis - SC, Brasil
fabio@canopyrсс.tech

Abstract: Remote sensing techniques have aided measurement and estimation of forest area and the identification of deforestation and forest degradation. Light Detection and Ranging (LiDAR) allows mapping the vertical structure of forests and helps obtaining information in areas of difficult access. This study was conducted in two areas in the municipality of Feliz Natal, Mato Grosso, Brazil. The first area (area 1) was burned in 2006, 2008 and 2011, while the second area (area 2) was subjected to selective logging in 2006 and 2007. Both areas were inventoried in the field: area 1 in 2013 and area 2 in 2015, totalizing 27 samples. In addition to the field data, airborne LiDAR data were acquired for the two areas in August 2013. The objective of this study was to use LiDAR data to estimate aboveground biomass (AGB) in these areas and understand the differences in their carbon stocks as a result of fire and selective logging. Structure metrics extracted from the point cloud data were linearly and highly correlated with AGB. The multiple regression model created with the stepwise procedure presented an R^2 of 0.96 and a root mean square error of 8.7 Mg/ha (25.3%). Using LiDAR data, it was possible to model the relationship between AGB and LiDAR metrics for areas that have been degraded by fire and selective logging. The results showed a difference in carbon stocks of 15.8% for these areas, indicating that the degradation by fire was considerably more intense in this site.

Palavras-chave: Remote sensing, biomass, forest degradation, LiDAR, sensoriamento remoto, biomassa, degradação florestal.

1. Introdução

A Floresta Amazônica vem sofrendo constantes mudanças nos últimos anos por ações antrópicas, resultando em significativa alteração em seu uso e cobertura. Este bioma abrange uma área superior a 6,5 milhões de km², em nove países, com 67% destes pertencentes ao território brasileiro (INPE, 2016).

O desmatamento é uma forma abrupta de alteração do uso e cobertura florestal, em que ocorre a retirada total da vegetação presente em uma determinada área. Além do desmatamento a floresta pode sofrer, distúrbios naturais ou antrópicos, que alteram sua dinâmica. Estes distúrbios são caracterizados como processo de degradação, onde ocorre a retirada ou morte parcial da vegetação (Martins et al. 2006).

No ano de 2015 o estado do Mato Grosso apresentou o segundo maior incremento de área degradada dos estados que compõem a Amazônia Legal, ficando atrás apenas do estado do Pará. Estima-se a degradação de uma área de aproximadamente 1.479,1 km² valor significativamente maior que o observado nos estados de Rondônia (736,92 km²), Amazonas (706,9 km²), Roraima (4,4 km²) (DETER, 2015).

Uma característica de áreas degradadas é a perda de biomassa florestal acima do solo (*Above-Ground Biomass* - AGB), constituída de aproximadamente 50% de carbono. Portanto a perda de AGB oriunda da degradação de grandes áreas influencia diretamente o ciclo do carbono, denotando a ação antropogênica para com este ciclo (Bala et al. 2007). Uma forma

de degradação comum em florestas tropicais é o fogo, o qual afeta a estrutura florestal, modificando os estoques e os fluxos de carbono (Denman et al. 2007). A degradação pelo fogo na Amazônia Legal se intensifica em épocas secas, mas necessita da ação do homem para iniciar o processo de queimada (Aragão et al. 2009), contribuindo com o incremento líquido de carbono para atmosfera de 0,1 a 0,4 Pg C ano⁻¹ (Houghton et al. 2000).

O Projeto de Mapeamento da Degradação Florestal Na Amazônia Brasileira (DEGRAD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utiliza sensores orbitais ópticos para realizar o monitoramento, detectando áreas em estágios avançados de degradação, onde a influência do solo é constatada. A recente tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) é uma ferramenta eficaz para monitorar áreas degradadas, mesmo estas não apresentando representatividade espectral do solo, possibilitando obter informações da estrutura tridimensional da floresta, a partir de métricas extraídas das nuvens de pontos, as quais possibilitam inferir parâmetros que caracterizam o estado de degradação (Andersen et al. 2014; Cordeiro et al. 2015; Locks e Amarala 2015; Pinagé et al. 2015).

Outra fonte de distúrbio comum na Amazônia é o manejo florestal de impacto reduzido (Asner et al. 2005). Contudo a heterogeneidade de florestas tropicais torna difícil minimizar os impactos, devido a distribuição das árvores de interesse, tipologia florestal, relevo, hidrografia e solo. A extração de espécies de interesse reduz a AGB da área manejada (Braz, 2005).

A biomassa acima do solo pode ser estimada utilizando a nuvem de pontos LiDAR, desde que as métricas obtidas apresentem correlação com os valores encontrados em campo, porém o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa (S_{YX}) variam de acordo com a complexidade da floresta. Ou seja, quanto maior a heterogeneidade estrutural do local, maior será a complexidade da nuvem de pontos, o que influencia as métricas extraídas (Clarck et al. 2004; Drake et al. 2003; Lefsky et al. 2007). As métricas também são influenciadas pela ocorrência de processos de degradação, os quais variam em magnitude e intensidade (Montealegre et al. 2014).

O intuito deste trabalho foi calibrar modelos de estimativa de biomassa a partir de dados LiDAR aerotransportado coletados na região norte do estado do Mato Grosso, Brasil, comparando uma área degradada por fogo com uma área de corte seletivo.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado no município de Feliz Natal localizado na região norte do estado do Mato Grosso, Centro-Oeste brasileiro. A região de estudo está inserida no bioma Amazônico, com temperatura média anual em torno de 24,9 °C e pluviosidade média anual de 1887 mm.

Duas áreas foram analisadas no município de Feliz Natal. A primeira área (área 1), é uma área degradada por processos de queimada ao longo dos anos de 2006, 2008 e 2011 (Figura 1A). Já a segunda área (área 2) (Figura 1B e 1C), sofreu corte seletivo em 2006 e 2007 como constatado pela análise visual de séries temporais de imagens Landsat a partir de 2003, auxiliadas com a análise da série de EVI da plataforma SATVeg¹ baseada no sensor MODIS. Na área 1 foram instaladas 20 parcelas de inventário e na área 2 foram instaladas 7 parcelas nas extremidades do transecto de varredura LiDAR (B e C).

¹ www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/

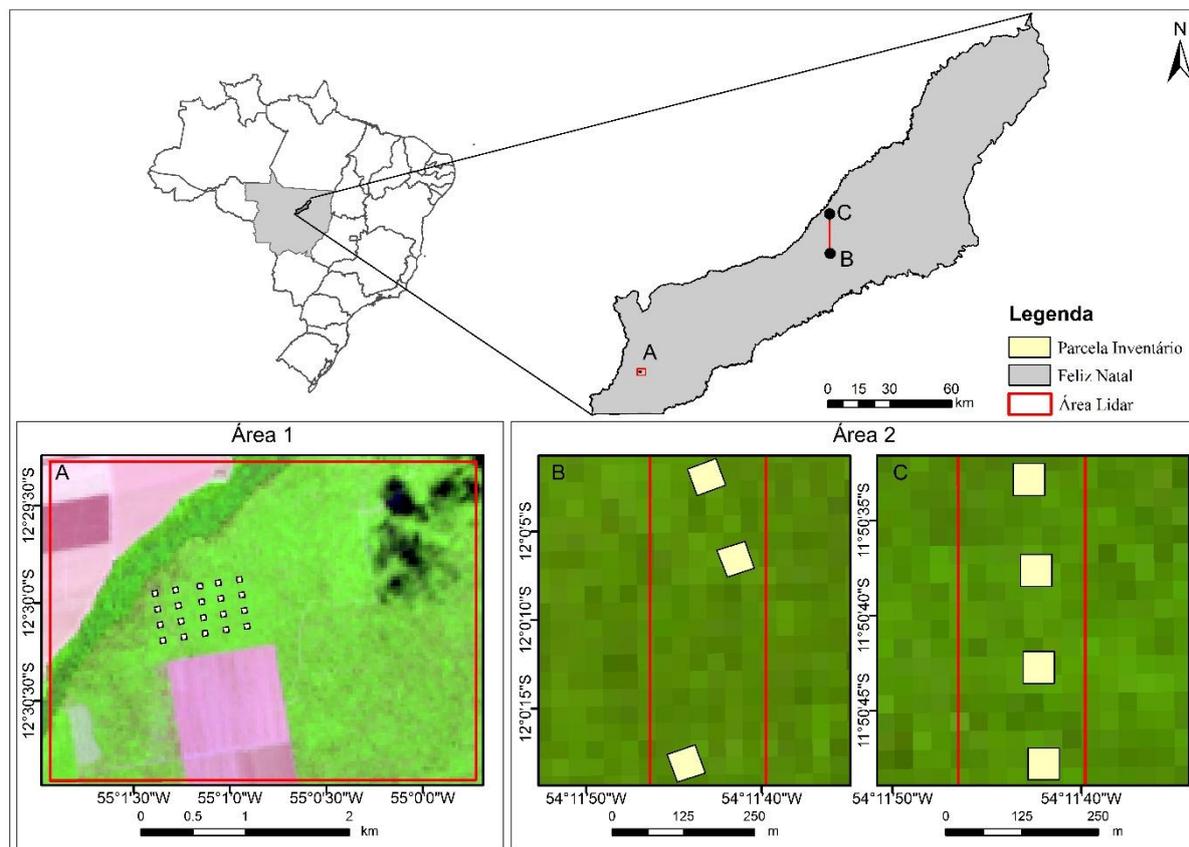


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo em relação ao município de Feliz Natal, MT. Os retângulos vermelhos indicam a área sobrevoada pelo LiDAR e os quadrados amarelos indicam a localização das parcelas de campo.

2.2 Dados de campo

Os dados do inventário de campo, para ambas as áreas, foram adquiridos do âmbito do Projeto Paisagens Sustentáveis², idealizado pelo *US Forest Service* (USFS), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), *United States Agency for International Development* (USAID) e *US Department of State Internacional* (USAID).

O inventário na área 1 foi realizado no ano de 2013 e na área 2 em 2015 seguindo a metodologia adotada pelo Projeto Paisagens Sustentáveis, totalizando 27 parcelas de 50 m x 50 m. A biomassa das árvores vivas e mortas foi calculada pelas Equações 1 (Chave et al. 2005) e 2 (Palace, 2007), respectivamente:

$$AGB = 0.0509 * WSD * DAP^2 * H_{tot} \quad (1)$$

$$AGB = Necromass\ volume * WSD \quad (2)$$

onde AGB é a biomassa seca acima do solo em kg; WSD é a densidade da madeira (g/cm^3); H_{tot} é a altura total da árvore (m), e *Necromass volume* é o volume de massa morta (m^3).

2.3 Dados LiDAR

Os dados LiDAR também foram adquiridos no âmbito do Projeto Paisagens Sustentáveis. O voo sobre as áreas 1 e 2 foi realizado em agosto de 2013, cobrindo uma área total de 1200 ha e 995 ha, respectivamente. As informações sobre a aquisição desses dados LiDAR são resumidas na Tabela 1 para ambas as áreas.

² <https://www.paisagenslidar.cnptia.embrapa.br/webgis>

Tabela 1: Características do voo para aquisição dos dados LiDAR.

Atributos	Área 1	Área 2
Sensor	Optech, Orion	Optech, Orion
Data da Aquisição	Agosto, 2013	Agosto, 2013
Densidade Média de Retorno	38,34 pts/m ²	36,46 pts/m ²
Densidade Média de Primeiro Retorno	25,84 pts/m ²	18,30 pts/m ²
Frequência de pulso	67,5 Hz	67,5 Hz
Sobreposição de faixas	65%	65%
Altitude de Voo	853 m	853,4 m
Campo de Visada	9,8°	11°

As nuvens de pontos LiDAR foram processadas utilizando o *software* FUSION versão 3.60 (McGaughey, 2016). Neste procedimento, primeiramente, foi utilizado o comando “*GroundFilter*” para eliminar possíveis *outliers*. Na sequência, para gerar o Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir da nuvem de pontos já filtrada, utilizou-se o comando “*GridSurfaceCreate*”, definindo-se uma malha com resolução espacial de 1 m². Após a geração do MDT, procedeu-se o processamento para gerar o CHM (*Canopy Height Model*) com a função “*CanopyModel*”. Por fim, se extraiu a nuvem de pontos coincidente com cada parcela *in situ* e foram calculadas as métricas de interesse com a função “*CloudMetrics*”.

Esse processamento resultou em um total de 92 métricas estruturais para cada parcela, incluindo métricas baseadas em altura, intensidade e número de retornos. Com o auxílio do *software* R, foi analisada a correlação de Pearson entre as métricas extraídas e a biomassa calculada em campo. Essas métricas foram submetidas a um método de seleção de variáveis baseado no ajuste de todos os possíveis modelos, visando a obtenção de um modelo de regressão adequado para a estimativa de biomassa a partir de métricas LiDAR. Após a seleção das variáveis, aplicou-se um procedimento de validação cruzada onde o conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em um subconjunto de treinamento (80% das observações) e um subconjunto de validação (20% das observações), para conhecimento da distribuição do erro do modelo quando aplicado a dados independentes (1000 iterações). Por fim, o modelo resultante foi utilizado para estimar a AGB em toda a área sobrevoada.

3. Resultados e Discussão

Embora haja dois anos de diferença entre os inventários realizados nas áreas 1 e 2, essa defasagem temporal não inviabilizou a comparação entre as mesmas, tendo em vista que a área 2 é caracterizada como uma floresta adulta onde o crescimento anual pode ser assumido como desprezível (Soares-Filho et al. 2006). A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas da biomassa calculada em campo nas áreas 1 e 2.

Tabela 2: Estatística descritiva da biomassa (Mg/ha) calculada em campo nas áreas 1 e 2.

Parâmetros	Área 1	Área 2
Média	14,50	91,70
Erro Padrão	2,03	19,61
Mediana	12,79	87,34
Intervalo	36,62	167,95
Mínimo	3,45	20,08
Máximo	40,07	188,03
Soma	290,08	641,93
Parcelas	20	7

A diferença entre a biomassa calculada da área 1 e área 2 foi de 15,82% para a média das parcelas. Essa diferença está associada ao fato de que a área 1 perdeu biomassa por queimada, que é caracterizada com uma forma mais intensa de degradação se comparada com o corte seletivo. Embora tenham passados três anos desde a última queima até o inventário florestal, a área não teve tempo suficiente para recuperar a biomassa inicial, ficando evidente essa diferença entre as áreas (Figura 2), especialmente pela ocorrência de queimadas sucessivas, possivelmente ocasionando redução no potencial de resiliência do ecossistema.

É perceptível ao analisar a nuvem de pontos que a área 1 (Figura 2A) apresenta a maioria dos pontos de retorno representativos do solo e na vegetação até cerca de 8 metros, devido a não existência de árvores de grande porte nessa área. Já a área 2 (Figura 2B) possui maior densidade de indivíduos de grande porte e, conseqüentemente, evidenciou pontos distribuídos ao longo de todo o perfil vertical da floresta, com indivíduos medindo até 35 metros de altura.

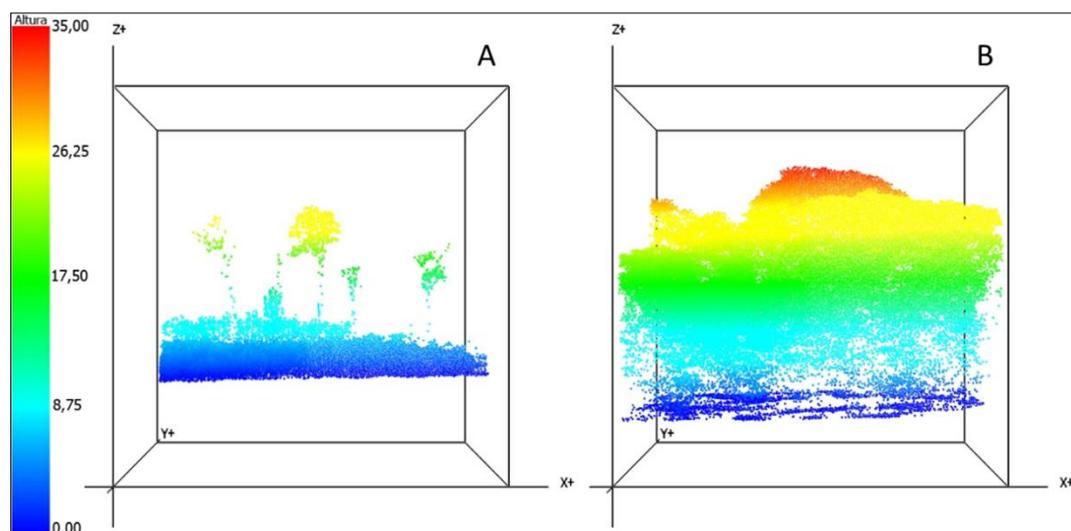


Figura 2: Nuvem de pontos LiDAR: A) Parcela na área afetada por fogo; B) Parcela na área que sofreu corte seletivo.

As métricas extraídas da nuvem de pontos LiDAR trazem informações referentes a quantidade, intensidade ou porcentagem de retornos em determinada altura da floresta. Dentre essas métricas, as mais correlacionadas com a biomassa estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3: Métricas LiDAR com maiores coeficientes de correlação de Pearson em função da biomassa.

Métrica	Coef. De Pearson	Métrica	Coef. De Pearson
Elev_MAD_median	0,89	Elev_P10	-0,77
Elev_IQ	0,88	Elev_AAD	0,77
Canopy_relief_ratio	0,87	Int_L3	0,77
Elev_P01	-0,82	Elev_P20	-0,76
Elev_minimum	-0,82	Elev_maximum	-0,76
Elev_L_CV	0,81	Elev_P60	-0,72
Elev_L2	0,8	Elev_P75	-0,68
Elev_P05	-0,79	%_all_ret_above5/tot_1_ret	0,62

O modelo de regressão selecionado incluiu as variáveis independentes *Elev P60*, *Elev P75* e *%_all_ret_above5/tot_1_ret*. As variáveis *Elev_P60* e *Elev_P75* descrevem a elevação nos

percentis 60 e 75, respectivamente (Montealegre et al. 2014), ao passo que a $\%_{all_ret_above5/tot_1_ret}$ se refere à proporção de retornos acima de 5 m em relação ao número total de primeiro retornos, indicando a abertura do dossel.

Utilizando as variáveis descritas acima se obteve a Eq. 3 com R^2 de 0,96 e RMSE de 8,7 Mg/ha (25,3%):

$$AGB = -575.59 - 76,31 * Elev_{P60} + 78,09 * Elev_{P75} - 0,84 * \%_{all_ret_above5/tot_1_ret} \quad (3)$$

A validação cruzada baseada em 1000 iterações resultou em um RMSE médio de 9,7 Mg/ha (28,1%), confirmando a boa capacidade preditiva do modelo quando aplicado a dados independentes.

A biomassa total da área sobrevoada pelo LiDAR foi estimada em 17,13 Gg (14,27 Mg/ha) para área 1 e 91,90 Gg (92,36 Mg/ha) para a área 2. Uma simples extrapolação dos valores de biomassa obtidos nas parcelas de campo resultou em valores totais de 14,43 Gg e 110,04 Gg para as áreas 1 e 2, respectivamente, indicando uma boa concordância com a estimativa baseada nos dados LiDAR (Figura 3), reforçando o potencial do LiDAR na estimativa de biomassa em florestas tropicais sujeitas a processos de degradação.

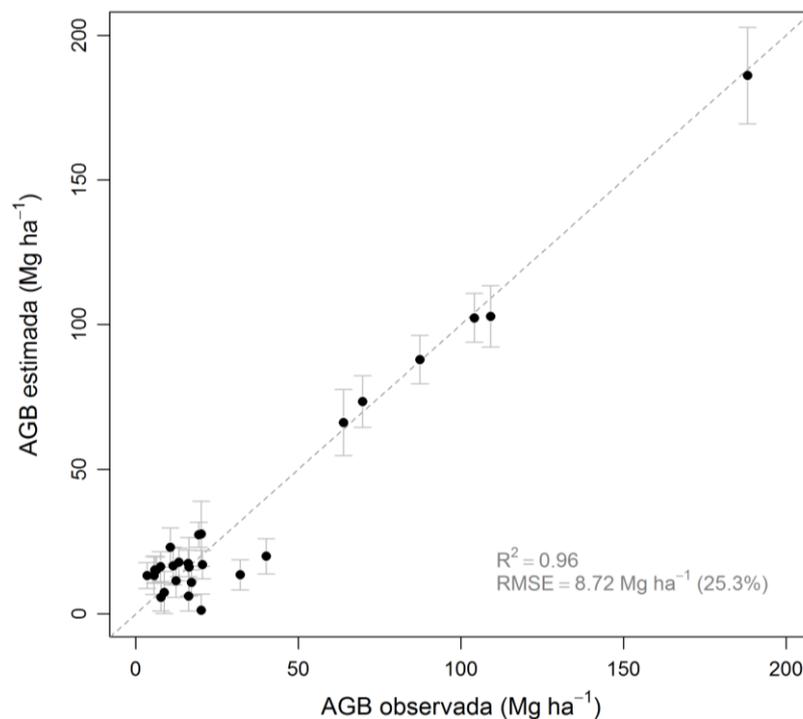


Figura 3: Biomassa estimada vs. biomassa observada ($Mg\ ha^{-1}$) nas 27 parcelas amostrais.

Não ocorreu saturação na estimativa de biomassa feita para áreas de até 200 Mg/ha . Contudo, como houve um número reduzido de pontos em áreas de maior biomassa, para estudos futuros, há a necessidade de incluir mais parcelas nessas áreas, abrangido de melhor maneira toda a distribuição da biomassa ao longo da floresta.

4. Conclusões

A área afetada pelo fogo sofreu significativa perda de biomassa acima do solo. A biomassa nessa área foi inferior quando comparada com a área afetada por corte seletivo, mesmo 2 anos após a queimada. A degradação florestal ocasionada pela queimada afetou com maior intensidade a estrutura da floresta medida pelo LiDAR, quando comparada ao corte

seletivo. A biomassa foi estimada em 14,27 Mg/ha para a área degradada por fogo e em 92,36 Mg/ha para a área de corte seletivo.

Apesar da diferença da biomassa entre as áreas estudadas, o modelo ajustado apresentou resultados satisfatórios na estimativa quando comparado com os valores calculados em campo. As métricas obtidas a partir da nuvem de pontos LiDAR em diferentes percentis de altura da floresta auxiliaram na representação da estrutura vertical da vegetação presente nas parcelas, favorecendo a estimativa da biomassa.

Embora o modelo tenha apresentado bom desempenho na estimativa de biomassa florestal, não se descarta a necessidade de utilizar uma quantidade maior de amostras de calibração para a estimativa de AGB visando a redução do erro.

Agradecimentos

Os dados LiDAR e do inventário florestal foram adquiridos do Projeto Paisagens Sustentáveis desenvolvido pela EMBRAPA, US *Forest Service, United States Agency for International Development* e US *Department of State Internacional*.

Referências Bibliográficas

Andersen, H. E.; Reutebuch, S. E.; Mcgaughey, R. J.; D'oliveira, M. V.; Keller, M. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat LiDAR flights. **Remote Sensing of Environment**, ed. 151, p. 157-165, 2014.

Aragão, L. E. O. C.; Shimabukuro, Y. E.; Lima, A.; Anderson, L. O.; Barbier, N.; Saatchi, S. Utilização de produtos derivados de sensores orbitais para o estudo de queimadas na Amazônia. In **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 919-925, 2009.

Asner, G. P., Knapp, D. E., Broadbent, E. N., Oliveira, P. J., Keller, M., & Silva, J. N. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science**, 310(5747), 480-482, 2005.

Bala, G.; Caldeira, K.; Wickett, M.; Phillips, T. J.; Lobell, D. B.; Delire, C.; Mirin, A. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, ed. 104(16), p. 6550-6555, 2007.

Braz, E. M. **Planejamento e exploração em florestas naturais**. Colombo: Embrapa Florestas, p. 32, 2005.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riera B.; Yamakura, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145(1), p. 87-99. 2005.

Clark, M. L.; Clark, D. B.; Roberts, D. A. Small-footprint LiDAR estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. **Remote Sensing of Environment**, ed. 91(1), p. 68-89, 2004.

Cordeiro, C. L. de O.; Rossetti, D. de F.; Leitold, V. Estimativas de dados fitoestruturais de campinaranas florestadas a partir de dados LIDAR. In **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.

Denman, K. L.; Brasseur, G. P.; Chidthaisong, A.; Ciais, P.; Cox, P. M.; Dickinson, R. E.; Lohmann, U. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. **Climate change 2007: The physical science basis**, 2007.

DETER Sistema de Detecção do Desmatamento na Amazônia Legal em Tempo Real. Relatório de avaliação. 2015. Disponível em < <http://www.obt.inpe.br/deter/nuvens.php>>. Acesso em 10 de outubro de 2016

Drake, J. B.; Knox, R. G.; Dubayah, R. O.; Clark, D. B.; Condit, R.; Blair, J. B.; Hofton, M. Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using lidar remote sensing: Factors affecting the generality of relationships. **Global ecology and biogeography**, ed. 12(2), p. 147-159, 2003.

Houghton, R. A.; Skole, D. L.; Nobre, C. A.; Hackler, J. L.; Lawrence, K. T.; Chomentowski, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, ed. 403(6767), p. 301-304, 2000.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Projeto PRODES: Monitoramento Da Floresta Amazônica Brasileira Por Satélite. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.>>. Acesso em 16 de julho 2016.

Lefsky, M.A.; Keller, M.; Panga, Y.; De Camarg, P.B.; Hunter, M.O. Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms. **Journal of Applied Remote Sensing**, p. 1-18, 2007.

Locks, C. J.; Amaral, L. G. C. Análise multitemporal de dados LiDAR para avaliação da recuperação no sub-bosque florestal em concessões florestais. In **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.

Martins e Souza Filho, P. W.; Paradella, W. R.; Souza Júnior, C.; Valeriano, D. D. M.; Miranda, F. P. D. Sensoriamento remoto e recursos naturais da Amazônia. **Ciência e Cultura**, ed. 58(3), p. 37-41, 2006.

McGaughey, R. J. **FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization**. Seattle, WA: USFS, p. 211, 2016.

Montealegre, A. L.; Lamelas, M. T.; Tanase, M. A.; De La Riva, J. Forest fire severity assessment using ALS data in a Mediterranean environment. **Remote Sensing**, ed. 6(5), p. 4240-4265, 2014.

Palace, M.; Keller M.; Asner, G.P.; Silva, J.N.M.; Passos C. Necromass in undisturbed and logged forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**. ed. 238, p. 309-318. 2007.

Pinagé, E. R.; Keller, M.; Dos-Santos, M. N.; Spinelli-Araújo, L.; Longo, M. Avaliação temporal dos efeitos da exploração madeireira usando dados Lidar. In **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.

Soares-Filho, B. S.; Nepstad, D. C.; Curran, L. M.; Cerqueira, G. C.; Garcia, R. A.; Ramos, C. A.; Schlesinger, P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, ed. 440(7083), p. 520-523, 2006.