

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Tiago Luis Badin

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA UTILIZANDO DADOS LIDAR EM FLORESTA
TROPICAL**

Santa Maria, RS

2018

Tiago Luis Badin

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA UTILIZANDO DADOS LIDAR EM FLORESTA
TROPICAL**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira

Santa Maria, RS
2018

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da
Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Badin, Tiago Luis
Estimativa de Biomassa Utilizando Dados LiDAR em
Floresta Tropical / Tiago Luis Badin.- 2018.
77 p.; 30 cm

Orientador: Rudiney Soares Pereira
Coorientador: Frederico Dimas Fleig
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2018

1. Amazônia 2. Laser Aerotransportado 3. Modelagem 4.
Regressão Linear 5. AGB I. Pereira, Rudiney Soares II.
Fleig, Frederico Dimas III. Título.

©2018

Todos os direitos autorais reservados a Tiago Luis Badin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: eng.tiagobadin@gmail.com

Tiago Luis Badin

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA UTILIZANDO DADOS LIDAR EM FLORESTA
TROPICAL**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**.

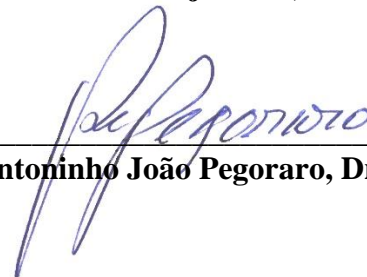
Aprovada em de 27 de fevereiro de 2018:



Rudiney Soares Pereira, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Emanuel Araújo Silva, Dr. (UFRPE)



Antoninho João Pegoraro, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha mãe, pelo amor, exemplo e pelo apoio sempre incondicional em todos os momentos. Dedico também a todos que me apoiaram e de alguma forma fizeram parte desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha mãe Irma, por ser minha fonte de inspiração a qual dedico todo meu esforço, amor, carinho, educação, compreensão e apoio.

Agradecimento especial a Diana pela paciência, companheirismo e amizade.

A meus familiares, pelo apoio e companheirismo de sempre.

Ao professor e orientador Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira, pela oportunidade, amizade, apoio, orientação, aprendizado e confiança depositada em mim ao longo dos anos de parceria e trabalho, iniciados na graduação e reforçados durante o Mestrado.

Ao Emanuel por me convidar para fazer parte do grupo de pesquisa do LabSERE.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, e aos mestres desta instituição pela oportunidade de realização do mestrado, pelos ensinamentos e formação pessoal e profissional.

Às instituições de fomento à pesquisa, CNPq e FATEC pelo auxílio financeiro e ao Sinditabaco pela concessão de bolsas de estudos aos alunos de graduação e pós-graduação.

Aos professores ao longo da caminhada, em especial, aos integrantes da banca de defesa pela participação. Agradeço pela disponibilidade e pelas contribuições.

Aos colaboradores da Família LabSERE, pelo auxílio imprescindível, apoio e otimismo, pela cooperação em todos os momentos necessitados, pelo auxílio nas atividades decorrentes.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Sensoriamento Remoto: Mateus Frigo, Dionatas, Helena e demais que passaram por lá por todo o apoio, amizade e colaboração.

A todos os colegas da Pós-Graduação: Alessandra, Elisiane Alba, Eliziane Mello, Fabio, José Augusto, Juliana e Mateus Schuh. Muito obrigado, aprendi muito com vocês.

A todos meus amigos pelo companheirismo e amizade.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma ou outra contribuíram para mais essa conquista.

Muito obrigado!

“Nunca deixe os outros saberem o que você está pensando”

DOM CORLEONE

“No meio da dificuldade está a oportunidade”

ALBERT EINSTEIN

RESUMO

ESTIMATIVA DE BIOMASSA UTILIZANDO DADOS LIDAR EM FLORESTA TROPICAL

AUTOR: Tiago Luis Badin
ORIENTADOR: Rudiney Soares Pereira

As florestas tropicais brasileiras, principalmente a Amazônia, armazenam na sua biomassa grande parte do estoque global de carbono, em virtude do desmatamento e degradação já houve um comprometimento considerável, catalisando a liberação de gases efeito estufa na atmosfera agravando os efeitos do aquecimento global. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar a biomassa acima do solo a partir de dados provenientes de laser aerotransportado em floresta tropical amazônica. Utilizou-se dados de inventário para calcular a biomassa acima do solo, valores calculados por intermédio do modelo ajustado por Chave et al. (2015) adaptado para regiões tropicais. Posteriormente, as variáveis oriundas do software FUSION 3.6, provenientes do levantamento a laser aerotransportado, foram pré-selecionadas utilizando o método Stepwise. Na modelagem foram testados seis modelos: Linear, multiplicação, exponencial, parábola, polinômio de grau três e polinômio de grau quatro, onde as variáveis Elev.CV, Elev.P99, Elev.MAD.mode e Elev.L3 oriundas do laser compuseram o modelo final. O melhor modelo foi o polinomial de grau quatro, sem intercepto, que obteve coeficiente de determinação (R^2) 0,76, erro padrão da estimativa (Syx) 26,99, coeficiente de variação (CV) 36,29, eficiência (E) 0,99, e índice de tendência absoluta (BIAS) -0,00005, e, portanto, foi selecionado pelos critérios estatísticos, posteriormente validado pelo teste t de *student*. Com isso, a modelagem com os dados do inventário relacionados a métricas LiDAR mostraram-se eficientes na caracterização da floresta tropical mostrando que é possível utilizar essa tecnologia para obter estimativas da biomassa acima do solo em florestas tropicais.

Palavras-chave: Amazônia. Laser Aerotransportado. Modelagem. Regressão Linear. AGB.

ABSTRACT

BIOMASS USING LIDAR DATA IN TROPICAL FOREST

AUTHOR: Tiago Luis Badin
ADVISOR: Rudiney Soares Pereira

The Brazilian rainforests, mainly the Amazon, store in their biomass a large part of the global carbon stock, as a result of deforestation and degradation there has already been a considerable commitment, catalyzing the release of greenhouse gases into the atmosphere, aggravating the effects of global warming. In this context, the objective of this work was to estimate the above - ground biomass from data from airborne laser in Amazon rainforest. We used inventory data to calculate the biomass above the soil, values calculated through the model adjusted by Chave et al. (2015) adapted for tropical regions. Subsequently, the variables from the FUSION 3.6 software, derived from the airborne laser survey, were pre-selected using the Stepwise method. In the modeling, six models were tested: Linear, multiplication, exponential, parabola, polynomial of degree three and polynomial of degree four, where the variables Elev.CV, Elev.P99, Elev.MAD.mode and Elev.L3 from the laser composed the final model. The best model was the polynomial of degree four, without intercept, which obtained coefficient of determination (R^2) 0.76, standard error of estimate (S_{yx}) 26.99, coefficient of variation (CV) 36,29, efficiency (E) 0.99, and absolute trend index (BIAS) -0.00005, and was therefore selected by the statistical criteria, later validated by the student's t-test. Thus, modeling with the inventory data related to LiDAR metrics proved to be efficient in the characterization of the tropical forest, showing that it is possible to use this technology to obtain estimates of above-ground biomass in tropical forests.

Keywords: Amazonia. Airborne Laser. Modeling. Linear Regression. AGB.

LISTA DE ANEXOS

Anexo I - Detalhes técnicos das métricas LiDAR, FUSION/LDV 3.6.....71

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	40
----------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da obtenção da nuvem de pontos de um sensor LiDAR aerotransportado.....	26
Figura 2 - Demonstrativo dos dois grandes grupos de biomassa florestal.....	28
Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo com as parcelas do inventário.....	35
Figura 4 - Parcela do inventário realizado na área de estudo.....	38
Figura 5 - Divisão do transecto em cinco parcelas.....	39
Figura 6 - Gráfico de intensidade para os valores calculados, por parcela.....	41
Figura 7 - Histograma de frequência das classes.....	47
Figura 8 - Gráfico da correlação de Pearson somente com variáveis acima de 0,7.....	49
Figura 9 - Box plot das variáveis melhor correlacionadas com a biomassa.....	50
Figura 10 - Gráfico de dispersão com valores observados, e valores preditos com o modelo ajustado.....	55
Figura 11 - Gráfico de dispersão dos resíduos.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis dendrométricas obtidas do inventário florestal.....	39
Tabela 2 - Características específicas do sensor de LiDAR.....	42
Tabela 3 - Análise descritiva dos dados no processamento da nuvem de pontos.....	43
Tabela 4 - Valores dos Box plots das 12 variáveis selecionadas.....	51
Tabela 5 - Variáveis selecionadas pela <i>Stepwise</i> na análise de regressão.....	51
Tabela 6 - Equações testadas para as métricas melhor correlacionadas.....	52
Tabela 7 - Ranqueamento dos modelos segundo critérios estatísticos.....	53
Tabela 8 - Validação dos modelos de predição da biomassa pelo teste t de <i>Student</i>	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS	<i>Airbourne Laser Scanner</i>
AGB	<i>Above-Ground Biomass</i>
AIC	Critério de Informação de Akaike
BGB	<i>Below-Ground Biomass</i>
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CHM	<i>Canopy Hieght Models</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRAN	<i>Comprehensive R Archive Network</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DAP	Diâmetro a Altura do Peito
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
Funbio	Fundo Brasileiro para a Biodiversidade
GEF	Fundo Mundial para o Meio Ambiente
GEEs	Gases do Efeito Estufa
GIS	<i>Geografic Information System</i>
GPL	<i>General Public License</i>
DGPS	<i>Diferencial Global Position System</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IFT	Instituto Floresta Tropical
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças no Clima
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície

MMA	Ministério do Meio Ambiente
NOOA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
Prodes	Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia
ONU	Organização das Nações Unidas
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
REDD	<i>Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation</i>
SAR	Radar de Abertura Sintética
SEMA-PA	Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Pará
SIG	Sistema de Informações geográficas
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SIVAM	Sistema de Vigilância da Amazônia
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 BIOMA AMAZÔNIA	20
3.2 SENSORIAMENTO REMOTO	23
3.3 LIDAR.....	25
3.4 ESTIMATIVA DA BIOMASSA	27
3.5 PROJETO PAISAGENS SUSTENTÁVEIS	30
3.6 MODELAGEM	31
3.7 LINGUAGEM R	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	35
4.1.1 Clima.....	36
4.1.2 Geomorfologia e Hidrologia	37
4.1.3 Solos	37
4.1.4 Vegetação.....	37
4.2 INVENTÁRIO FLORESTAL.....	38
4.3 OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS LIDAR	41
4.4 MODELAGEM DA BIOMASSA.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 DADOS DE INVENTÁRIO	47
5.2 ESTOQUE DE BIOMASSA VIA LASER AEROTRANSPORTADO	48
5.3 MODELAGEM DA BIOMASSA.....	48
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	70

1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais armazenam aproximadamente 59% do carbono global estocado na vegetação e 27% do total estocado no solo. A Amazônia brasileira armazena cerca 33% da reserva de florestas tropicais, mas em virtude do desmatamento cerca de 15% dela já foi comprometida (DIXON et al., 1994). Segundo Constanza et al. (1997), os valores dos serviços gerados por alguns ecossistemas da terra custariam 33 trilhões de dólares/ano, em benefícios a humanidade, tal valoração, segundo o autor, tem importância no processo de conscientização da sociedade, assim como para a manutenção e regeneração deste serviços.

A ocupação antrópica causa fragmentação de paisagens e degradação ambiental nos mais importantes biomas e formações vegetais como Pantanal, Mata Atlântica, Cerrado e Amazônia ocasionam perdas irreparáveis de biodiversidade. Estima-se que as florestas cobrem cerca de 30% da superfície da terra e estocam em torno de 85% do carbono orgânico disponível no meio ambiente (HOUGHTON, 1994).

No entanto, o aumento desproporcional da concentração de gases efeito estufa (GEEs) na atmosfera e o conseqüente aquecimento do sistema climático da terra têm levado a comunidade internacional a criar e estabelecer instituições e mecanismos voltados para a gestão deste problema (MÜLLER et al., 2009; RIBEIRO, 2011). Como o meio ambiente é patrimônio de todos, somos responsáveis pelos ecossistemas do planeta. Dada a relevância das florestas no ciclo do carbono global, o interesse de instituições mundiais voltadas a pesquisa cresceu em especial nos biomas Mata Atlântica e Amazônia.

As técnicas de sensoriamento remoto são uma alternativa para o monitoramento de regiões de grandes áreas principalmente as de difícil acesso, como é o caso da maior parte da região amazônica, entretanto, poucos esforços foram observados tanto no mapeamento quanto no monitoramento florestal. Em virtude disso, a crescente necessidade agilizar e embasar estimativas tem motivado estudos com dados de sensoriamento remoto, como auxílio à quantificação volumétrica de variáveis provenientes de povoamentos florestais (OLIVEIRA et al., 2014).

De acordo com Watzlawick (2003), estudos de quantificação da biomassa florestal são trabalhosos, demorados e muito onerosos, podendo os mesmos serem realizados por meio de métodos diretos e indiretos. Pelo método direto, as árvores são cortadas e seus componentes separados e pesados, e pelo método indireto são utilizadas equações alométricas ou produtos de sensoriamento remoto.

Assim, o autor ressalta a importância da utilização das técnicas de sensoriamento remoto e os Sistemas de Informação Geográficas (SIG) nas estimativas de biomassa e estoque de carbono, visto que as mesmas possibilitam realizar quantificações, utilizando métodos não destrutivos, bem como realizar a espacialização das informações, tornando-se uma ferramenta útil, também, com finalidade de monitoramento.

Neste contexto, o perfilamento a laser é um método muito eficaz para estimar, quantificar e monitorar a biomassa acima do solo de diferentes tipologias de vegetação, em especial o modo aerotransportado, que surgiu como uma tecnologia alternativa, tornando-se a mais precisa maneira de obtenção de dados quando se trata de quantificar biomassa via sensoriamento remoto em paisagens florestais (CHEN, 2016).

O LiDAR (*Light Detection And Ranging*) se destaca como a mais recente tecnologia empregada na obtenção de medidas diretas da vegetação, como altura do dossel, o número de indivíduos, o volume e o diâmetro da copa (POPESCU et al., 2011). Assim, este sensor é indicado para a estimativa de biomassa florestal, pois as variáveis que podem ser medidas diretamente pelo LiDAR apresentam alta correlação com os dados de biomassa acima do solo medidas em campo (Drake et al., 2003).

O levantamento a laser tem grande potencial para as mais variadas aplicações em especial florestais, pela alta capacidade de mobilização de dados, por meio da obtenção de um elevado número de pontos com alta precisão e alta velocidade de aquisição de dados da estrutura vertical e horizontal das áreas florestais (GIONGO et al., 2010). Vários estudos comprovam a viabilidade de uso do perfilamento a laser na estimativa de variáveis florestais, porém, há necessidade de tecnologias para processamento das informações geradas (ZODONÁ et al., 2008).

Devido esta técnica ser sensível a pequenas variações do terreno e permite obter dados em áreas de vegetação densa, como é o caso das florestas tropicais (GOERGENS et al., 2014), torna-se importante a utilização do ALS (*Airbourne Laser Scanner*). O qual é eficiente para obter dados em floresta com elevada biomassa e porte volumétrico, sendo que outros tipos de dados como é o caso das imagens óticas ou sensores de radar enfrentam problemas de distinção de alvos que acaba dificultando o uso para determinados fins.

Neste contexto, a motivação para o presente estudo está na importância em se desenvolver novas técnicas para quantificação de biomassa em florestas tropicais nativas, em virtude da necessidade de relacionar dados de diferentes fontes, para melhorar acurácia de técnicas já existentes.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo estimar a biomassa acima do solo a partir de dados provenientes de laser aerotransportado em floresta tropical amazônica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a aplicabilidade da tecnologia LiDAR aerotransportado na estimativa de biomassa em áreas da Amazônia no município de Paragominas, Pará, Brasil.
- Examinar a correlação existente entre a variável biofísica obtida por meio de inventário e as adquiridas com sensor LiDAR;
- Ajustar equação matemáticas para o cálculo de biomassa por unidade de área por meio de dados LiDAR;
- Validação dos modelos de estimativa da biomassa acima do solo em floresta tropical.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 BIOMA AMAZÔNIA

O bioma Amazônia abrange uma área de 4,2 milhões de km² e detém grande parte da biodiversidade global da fauna e flora. Este bioma abrange florestas densas e abertas e possui também características de outros ecossistemas, como florestas de igapó, florestas estacionais, campos alagados, várzeas, savanas, refúgios montanhosos e formações pioneiras (SNIF, 2014).

A Amazônia é o maior bioma do Brasil, sendo reconhecida como maior patrimônio de biodiversidade verdadeiramente intocada do mundo (MMA, 2018). A floresta é adaptada ao clima equatorial, com altas temperaturas e umidade, com chuvas abundantes. Esse bioma não abrange somente o território brasileiro, mas também Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela. O maior bioma de floresta tropical do planeta abriga também vastos estoques de madeira comercial e de carbono, além de uma gama de produtos florestais não madeireiros que é responsável pelo sustento das comunidades que lá estão inseridas (SNIF, 2014). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) as características específicas do bioma Amazônia são os principais motivos da floresta existir, tais como: temperatura, umidade, solos, hidrografia, fauna e flora.

O clima amazônico é constante, com pouca variação de temperatura, a qual apresenta uma média anual de 25 °C. A precipitação média do bioma é de 2.300mm por ano, sendo que o mês de janeiro é o mais seco, enquanto que o mês de julho corresponde ao período mais quente (MARENGO e NOBRE, 2009).

Os solos presentes na floresta Amazônica são de baixa fertilidade, em sua maioria arenosos e com poucos nutrientes naturais (FERREIRA et al., 2001). O autor destaca que essas propriedades, juntamente com os índices pluviométricos e as altas temperaturas, tornam esses solos susceptíveis a erosão e rápida degradação sendo de difícil recuperação, quando comparado a outros biomas.

A região amazônica abriga a maior rede hidrográfica do mundo e concentra 15% das águas doces superficiais não congeladas do planeta (SNIF, 2014). Os principais rios da bacia são Rio Amazonas, maior do mundo em extensão e volume de águas, o Rio Negro e o Rio Solimões. Os rios da Amazônia possuem a maior diversidade do planeta de peixes catalogados com cerca de 1.500 espécies.

A fauna da floresta Amazônica é rica em sua diversidade de espécies, de mamíferos, aves, répteis, peixes e insetos que sobrevivem na singularidade que a Amazônia oferece. A flora do bioma Amazônia é composta basicamente por três grandes tipos de formações vegetais: Mata de igapó, Mata de terra firme, Mata de várzea (CARVALHO, 2004).

A Mata de igapó são as áreas baixas com árvores adaptadas a regiões alagadas próximas aos rios, onde os solos estão na maioria do tempo alagados. A vegetação predominante é de baixo porte. A Mata de terra firme corresponde as áreas de alto relevo, não atingidas por inundações como as de igapó (FERREIRA et al., 2005). O mesmo salienta que, são árvores de grande porte e determinam a fisionomia da comunidade com espécies como: andiroba, angelim, castanheira, cedro, mogno entre outras. Já a Mata de várzea são áreas de terra intermediárias que podem sofrer inundações e são adaptadas para viver alguns meses submersas e voltam a brotar quando a água está baixando, geralmente são solos mais férteis, pois no período de cheia as águas depositam sedimentos ricos em nutrientes (FREITAS, 2016).

Todos os biomas da terra sofreram com a ocupação antrópica, na Amazônia diversas intervenções acarretaram na perda de áreas nativas causada principalmente pela agricultura, pecuária, mineração e geração de energia. Neste século com o crescimento das *commodities* as maiores pressões têm ocorrido devido à plantação de soja e a criação de gado, se tornando um problema ambiental contemporâneo grave (LUCCI, 2010). O autor destaca que apesar de todos os mecanismos de vigilância dos órgãos reguladores, inclusive via satélite, não é apreciada nenhuma diminuição do desmatamento.

O uso do sensoriamento remoto tornou-se promissor no monitoramento do meio ambiente, devido à vantagem de reunir informações sobre extensas áreas com alta resolução espacial, espectral e temporal (VERSTRAETE et al., 1996). Atualmente, existem vários programas e aplicações de monitoramento da Amazônia que utilizam variadas fontes de dados. Dentre estes programas tem-se o Prodes (Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia) realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que realiza o monitoramento do desflorestamento desde 1974, utilizando técnicas de interpretação visual de imagens de satélite LANDSAT TM/ETM+. O método permite identificar alterações na cobertura florestal a partir de 6,25 hectares, utilizando imagens na escala 1:250.000, além de fornecer estimativas da extensão e taxa média do desflorestamento bruto.

O monitoramento da atividade madeireira é feito pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) através de vistorias, ainda não existe um programa em operação para monitorar a exploração madeireira utilizando sensoriamento

remoto. Entretanto vários estudos foram feitos para estimar a área anual afetada pela exploração madeireira na Amazônia. Nepstad et al. (1999) estimou, através de entrevistas de campo, uma área afetada pela exploração madeireira variando entre 10.000 e 15.000 Km²/ano. Matricardi et al. (2001) utilizou um método semiautomático, análise automática mais interpretação visual, para mapear e quantificar a área afetada pela exploração madeireira nos anos 1992 até 1999. A área afetada foi inicialmente de 5.627 Km² e aumentou para 23.379 Km² no último ano da pesquisa.

O INPE em parceria com o IBAMA/Proarco desde 1998 vem monitorando as queimadas na Amazônia. O método consiste na detecção de focos de calor através de imagens do satélite NOAA (quatro vezes ao dia). Desde setembro de 2002 as queimadas passaram a ser detectadas também pelos satélites GOES-8 (oito vezes ao dia) e AQUA/TERRA (quatro vezes ao dia com imagens MODIS), totalizando 16 detecções por dia. A metodologia permite integrar informações obtidas de imagens de satélite com SIG, tornando as ações de prevenção e combate a queimadas mais eficientes (INPE, 2004b).

O Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), tem como principal objetivo implementar uma infraestrutura de levantamento e análise de dados que gere informações para auxiliar na proteção e desenvolvimento sustentável da região amazônica. O sistema possui uma infraestrutura comum e integrada de meios técnicos para adquirir e tratar os dados, visualizar e difundir imagens, mapas e previsões (SIVAM, 2004).

O SIVAM está integrado ao Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), que é o braço civil do SIVAM. O SIPAM utiliza sensores e estações receptoras para satélites meteorológicos e formadores de imagens, radares de controle do tráfego aéreo principal e secundário, radares meteorológicos, estações meteorológicas terrestres e espaciais (balões), plataformas para coleta dos dados ambientais, auxílios à navegação aérea, equipamentos para interceptar e localizar sinais eletromagnéticos, comunicações telefônicas e via rádio, fax, modem, aeronaves com radares de vigilância e de abertura sintética, e capacidade para captação de imagens espectrais e infravermelhas (SIVAM, 2004).

Todos os programas de monitoramento da alteração da cobertura florestal da Amazônia, hoje operados pelo INPE, utilizam o sistema de informações geográficas chamado *TerraAmazon*. Este sistema é construído baseado na biblioteca de classes e funções de sistema de informação geográfica (SIG) para desenvolvimento de aplicações geográficas desenvolvidas pelo INPE e seus parceiros, chamada *TerraLib*. Esta biblioteca está disponível na internet com código aberto (*open source*), permitindo um ambiente colaborativo para o desenvolvimento de várias ferramentas de SIG (INPE, 2017).

3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto tem uma estreita ligação com o desenvolvimento da fotografia aérea e à pesquisa aeroespacial. Uma das maiores contribuições foi o desenvolvimento tecnológico e corrida armamentista que ocorreu durante a primeira guerra mundial, com a aviação em ascensão e aperfeiçoamentos fotográficos (NOVO, 2010). No entanto, esse aperfeiçoamento num primeiro momento de uso militar, permitiu um salto na tecnologia e utilização nos mais variados estudos na área civil (MOREIRA, 2005).

Com a evolução da tecnologia dos sensores e técnicas de sensoriamento, a superfície terrestre passou a ser observada com um nível de detalhamento muito maior, possibilitando notar suas nuances e modificações cada vez mais rapidamente. O foco dessas ferramentas é a obtenção de sucessivos dados de imagens, bem como a extração das informações, possibilitando o contínuo monitoramento do globo e seus recursos naturais e não naturais (MENESES, 2012).

A definição de sensoriamento remoto não é unanimidade na comunidade acadêmica e apresenta algumas divergências no ponto de vista de alguns (NOVO, 2010). A medida que os anos passaram eles foram aprimorados e atualizados com o uso em diferentes áreas do conhecimento, sendo melhor compreendido e conseqüentemente aplicado.

Segundo Elachi (1987) sensoriamento remoto é a obtenção de informação a respeito de um objeto sem contato com o mesmo. Florenzano (2002) completa que é uma tecnologia para obtenção de imagens e informações da terra com a resposta espectral emitida e refletida sem contato físico entre sensor e alvo. Jensen (2009) acrescenta que o Sensoriamento Remoto é a tecnologia com a capacidade de registro de informações da radiação eletromagnética e as partículas que constituem a Terra, por meio dos instrumentos sensores nas mais diversas localizações e de forma mais contemporânea.

As evoluções do sensoriamento remoto acompanhado por acréscimo de tecnologia computacional e desenvolvimento de novos satélites e sensores, aumentou as possibilidades que inicialmente eram limitadas (MOREIRA, 2005). Além disso, as tecnologias de transferência de imagens orbitais para a terra eram deficitárias, os primeiros sensores imageadores apresentavam resolução espacial de 80 m com dificuldades de transmissão dos dados para os pontos de controle, já no ano de 2014, foi lançado o satélite WorldView-3, como sendo o satélite de maior tecnologia já enviado ao espaço com 29 bandas espectrais e com nível de detalhamento espacial de até 30 cm (DIGITAL GLOBE, 2017).

Nesse sentido, as evoluções e aplicações dos sistemas de sensoriamento remoto apresentam inúmeras opções de uso cada vez mais rápidas e precisas como por exemplo na agricultura, cartografia, ecologia, florestal, hidrologia, militar, extração de minerais, oceanografia, planejamento urbano entre outras (NOVO, 2010).

Para Jensen (2009) a possibilidade de monitoramento constante do uso e cobertura da terra com séries temporais estão entre as principais vantagens do sensoriamento remoto. A periodicidade de levantamento de informações de determinados alvos é muito vantajosa em estudos de evolução do uso e cobertura da terra, principalmente em grandes extensões de terra ou com acesso restrito (MOREIRA, 2005). Diversas vantagens tornam o sensoriamento remoto uma valorosa fonte de dados para os sistemas de processamento digital de imagens (PDI) e para os SIG acrescentando riqueza nas informações utilizadas (NOVO, 2010).

Segundo Sousa e Ponzoni (1998) as técnicas de sensoriamento remoto são de grande utilidade na área florestal principalmente no que diz respeito a determinação e quantificação de parâmetros florestais como biomassa e estoque de carbono e outras variáveis, contribuindo como método indireto de obtenção dessas estimativas. Dados de inventário podem ser incrementados com a utilização de dados de sensores orbitais e aerotransportado melhorando as estimativas e servindo como fonte de informações complementares no planejamento e estratégias de manejo (ORUÉ, 2002).

Além disso, a origem digital dos dados de sensoriamento potencializa as possibilidades de se trabalhar com algoritmos computacionais e equações de correção radiométrica e atmosférica facilitando não só a obtenção, mas o realce e classificação de diferentes padrões, que são utilizados para monitorar grandes extensões de terra em um curto período de tempo (SOARES FILHO, 1998).

Uma das mais recentes tecnologias em sensoriamento remoto é o perfilamento a laser terrestre e aerotransportado que tem potencialidades ainda inexploradas em especial na obtenção de parâmetros biofísicos florestais justamente pela sua capacidade e precisão na obtenção de dados dendrométricos, com custo relativamente baixo e alta velocidade na aquisição dados florestais em sua estrutura vertical e horizontal (GIONGO et al., 2010).

Segundo Zodoná et al. (2008), existem estudos que comprovam a viabilidade do uso de perfilamento a laser quando se trata de levantamentos de alta precisão para enriquecer variáveis levantadas a campo em ambientes florestais. Porém esbarramos nas tecnologias e técnicas computacionais de processamento que geram lentidão quando em grandes áreas.

3.3 LIDAR

A tecnologia LiDAR é um sistema de varredura a laser, são sensores ativos, ou seja, irradiam energia artificial para obter informações, sendo similares ao RADAR (*Radio Detection and Ranging*) (ZANDONÁ et al., 2008). É uma solução rápida e precisa para mapeamento planialtimétrico de grandes áreas em alta resolução (GORGENS et al., 2014).

As pesquisas sobre a potencialidade do uso de dados LiDAR para aplicações florestais começaram no meio da década de 70, com experiências usando instrumentos de perfilamento simples. Na década de 90, o ímpeto era o desenvolvimento de ferramentas para inventários florestais mais práticos e exploravam a capacidade dos instrumentos ALS para fornecer cobertura total das áreas. O uso de laser aerotransportado é atualmente sugerido como componente essencial de inventários florestais operacionais (NAESSET, 2007).

Além disso, muitos países utilizam o laser para construir modelos detalhados de elevação do solo que, em seguida, servem como uma nova fonte de dados para o mapeamento da vegetação e os inventários florestais. Atualmente, os dados ALS podem ser obtidos para aplicações em vários campos de um grande número de provedores e empresas topográficas, cada um com múltiplos sistemas.

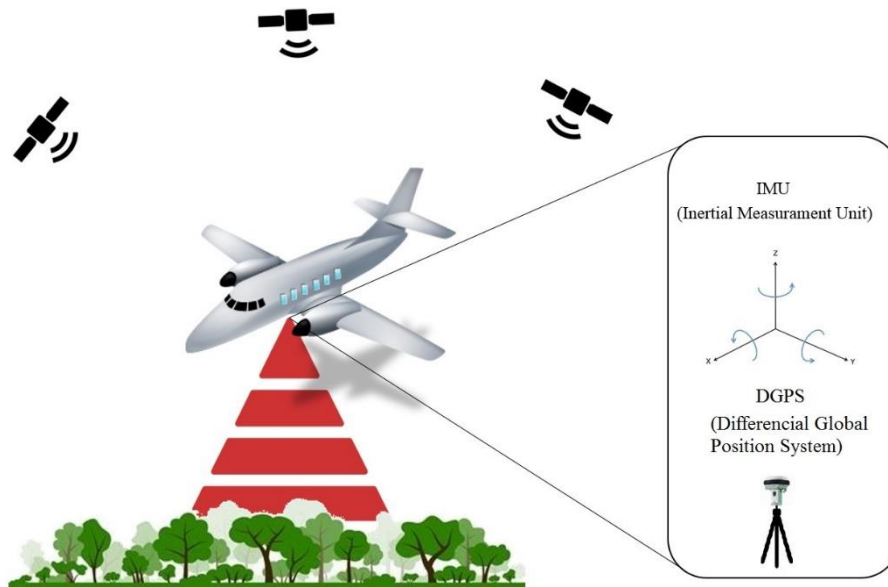
O princípio de funcionamento do LiDAR consiste na emissão de um pulso laser à velocidade da luz com uma alta frequência com grande número de repetições (RODRIGUEZ et al., 2010). O feixe é disparado em direção aos alvos através de um espelho, no sentido transversal se a plataforma for aerotransportada ou paralela caso seja scanner de laser terrestre (JENSEN, 2009).

O sistema DGPS (*Differential Global Position System*) é responsável por fornecer a localização de cada ponto imageado pelo laser. Para isso, são utilizados dois receptores de GPS que realizam observações simultâneas e em tempo real. Os dados de um receptor acoplado à aeronave são concatenados aos dados de outro receptor posicionado no solo. Não é recomendado que a aeronave se distancie mais que 20 km do sistema de GPS que está instalado no solo, pois a precisão dos dados coletados pode ser prejudicada (GIONGO et al., 2010).

Utilizando sistemas de medições auxiliares de alta precisão, como o DGPS para correções na velocidade, posição e altitude juntamente com o INS (*Inertial Navigation System*), também chamado de IMU (*Inertial Measurement Unit*), permitem registrar as oscilações em torno dos seus eixos para garantir a máxima precisão ao definir a posição

tridimensional de pontos na superfície em uma fase de pós-processamento como o mostra a Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática da obtenção da nuvem de pontos de um sensor LiDAR aerotransportado



Fonte: Autor.

O LiDAR se destaca como uma recente tecnologia empregada para a obtenção de medidas diretas da vegetação, como altura do dossel, o número de indivíduos, o volume e o diâmetro da copa (DUBAYAH et al., 2000; POPESCU et al., 2011). Assim, este sensor é indicado para a estimativa de biomassa florestal, pois as variáveis que podem ser medidas diretamente pelo LiDAR apresentam correlação com os dados de biomassa acima do solo (AGB) medidas em campo (DRAKE et al., 2003).

Além das informações descritas, o sistema armazena para cada ponto mapeado o valor de reflectância dos alvos, esses atributos podem ser utilizados para a geração de imagens e mapas temáticos, contribuindo para a identificação e restituição de feições no terreno (ZANODÁ, 2006). A autora destaca que é possível, por meio dessas informações, gerar ortoimagens de intensidade e de hipsometria (intensidade combinada com informação altimétrica).

Em florestas muito densas, uma parte do pulso laser emitido intercepta inicialmente na copa das árvores, outra parte penetra no sobosque, atingindo o estrato vegetal abaixo ou até mesmo a superfície do solo. Desta forma, um mesmo pulso gera vários retornos em diferentes estágios de profundidade, separadas normalmente em primeiro retorno, segundo retorno, dependendo das características do sensor até 11 retornos (GIONGO, 2010).

Devido a essas características, esta tecnologia apresenta-se como uma ferramenta proeminente para aquisição de dados de qualquer alvo com alta precisão. Em áreas florestais ela tornou possível conhecer não só a copa da vegetação, mas a estrutura do sub-bosque derivando informações para os mais variados estudos a respeito da cobertura vegetal.

As informações geradas são chamadas de métricas LiDAR, sendo estas compostas por um conjunto de parâmetros estatísticos. As métricas podem ser derivadas de uma nuvem original ou normalizada, havendo semelhanças entre os dados, porém diferem na coordenada “Z” na qual reflete valores em altura na nuvem normalizada (SILVA et al., 2013).

Para estudos de aplicações florestais, o pulso de laser é comumente emitido no comprimento de onda do infravermelho próximo (900-1200 *nm*) do espectro eletromagnético, pois, e essa é a região de maior reflectância da vegetação, fornecendo um melhor sinal de retorno ao LiDAR (LEFSKY et al., 2002). Além disso, os autores retratam que no comprimento de onda do infravermelho próximo, ocorre menor perda do sinal através do espalhamento e absorção pela atmosfera, entretanto, nesse comprimento de onda, ocorre absorção do sinal pelas nuvens, o que impede o uso deste sensor em condições nubladas.

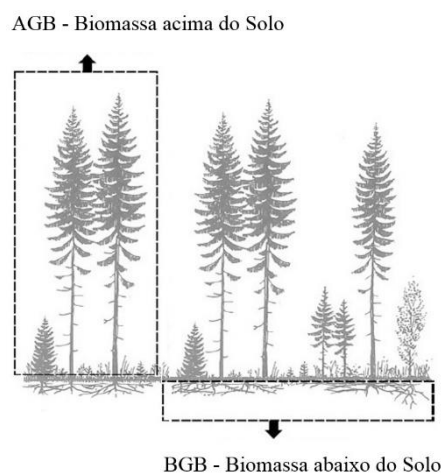
3.4 ESTIMATIVA DA BIOMASSA

A biomassa é formada não apenas por carbono, mas também é expressa por vários outros elementos químicos que compõem a estrutura orgânica das plantas como hidrogênio e oxigênio, os macronutrientes, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, e os micronutrientes, ferro, manganês, boro, cobre, zinco, molibdênio e cloro (MALAVOLTA, 1980).

A biomassa florestal engloba todas as partes integrantes das árvores tanto sobre o solo quanto abaixo dele e não apenas na sua fração arbórea/aérea (SILVEIRA et al. 2008). Segundo Sanquetta (2002), a biomassa pode ser conceituada como fitomassa, quando se considera apenas o carbono de origem vegetal da parte aérea das plantas.

Entretanto, a biomassa florestal normalmente é dividida em 2 grandes grupos denominados de biomassa acima do solo e biomassa abaixo do solo, pelo fato de tratar de partes diferentes das plantas. A Biomassa Acima do Solo (*Above-Ground Biomass*) diz respeito as partes superficiais da floresta enquanto que a BGB ou Biomassa Abaixo do Solo (*Below-Ground Biomass*) se refere as raízes e outras partes das plantas situadas abaixo do solo, como mostra na Figura 2.

Figura 2 - Demonstrativo dos dois grandes grupos de biomassa florestal



Fonte: Adaptada de Popescu (2002).

Existe um esforço para a quantificação de biomassa nas áreas florestais. A predição de biomassa está diretamente ligada a imobilização de carbono na forma de medida indireta (COOPER, 1983; CHAPMAN, 1986; SCHROEDER, 1992), pelo fato de não ser possível abater as árvores para fazer da forma direta e também pelo alto custo agregado para sua realização.

Watzlawick (2003) descreveram que a quantificação da biomassa florestal feita pelo método direto é trabalhosa, demorada e muito cara, pois envolvem procedimentos a campo, como de abate, separação e pesagem, se a intenção for somente quantificar carbono e não os outros elementos químicos o método indireto se mostra mais interessante. Brites et al. (2006) ainda destacaram que poucos estudos de avaliação de biomassa e carbono são desenvolvidos em ecossistemas tropicais, isso se deve à elevada complexidade destes ecossistemas.

A região amazônica é amplamente estudada, pesquisadores de universidades nacionais e internacionais desenvolvem estudos nas mais variadas áreas. Na área florestal existem vários

trabalhos, como estudos sobre a susceptibilidade ao fogo (HOLDSWORTH e UHL, 1997), biomassa viva (GERWING, 2002), desmatamento (VERÍSSIMO et al, 1995) e emissão carbono (HOUGHTON, 1994).

Na construção da equação Chave et al. (2015), utilizaram dados de 58 parcelas e 4004 árvores com dados oriundos da FAO. No estudo, foi utilizado um método destrutivo, onde as árvores foram cortadas e medidas. Além da representatividade dessa equação para o cálculo de biomassa de florestas tropicais, a escolha dessa equação foi motivada pelo fato dos parâmetros utilizados serem compatíveis com os dados disponíveis neste trabalho. Foram utilizados, nessa equação, dados de altura, diâmetro e densidade da madeira.

No trabalho de Chave et al. (2015), os autores obtiveram melhora na acurácia da determinação da biomassa florestal de florestas tropicais através da inclusão de densidade da madeira e abrangendo grande variedade de condições climáticas, tipos de solos, e tipos de vegetação. Segundo o autor, a precisão no mapeamento de estoque de biomassa acima do solo é importante para garantir implementação de técnicas de mitigação das alterações climáticas. O autor ainda resalta que a precisão depende da disponibilidade de modelos alométricos confiáveis para inferir biomassa acima do solo, o que ocorre principalmente pelo alto grau de incerteza associado aos modelos.

Estudos voltados a biomassa são executados de maneira direta por pesquisadores como Higuchi et al. (1998), Schumacher (2002), Vogel (2006), Watzlawick (2003) e também de maneira indireta de diversas formas, tais como mudanças estruturais na floresta tropical úmida com laser aerotransportado (HUNTER et al., 2015), integração de dados e mapas de biomassa tropical (AVITABILE et al., 2016), mudanças pós queimada na biomassa amazônica com ALS (SATO et al., 2016), caracterização do tipo de floresta com altura do dossel utilizando LiDAR aerotransportado (GORGENS et al., 2016), teste de algoritmos de modelagem para melhorar estimativas de biomassa com dados ALS na Amazônia brasileira (FENG et al., 2017) e estimativa de altura de árvores e biomassa de florestas tropicais (HUNTER et al., 2013).

Desse modo, é notável que houve ganhos nas medições remotas com LiDAR, e seguem ainda com grande potencial não explorado (BROWN, 2002). De acordo com o mesmo autor, a tecnologia reproduz a área da copa, as alturas, a densidade da copa e galhos das plantas com medidas altamente precisas e correlacionadas muito interessantes para estimativas de biomassa.

Para Drake et al. (2003), a tecnologia LiDAR é um aperfeiçoamento de muitas técnicas de sensoriamento remoto existentes que são incapazes de obter estimativas confiáveis da biomassa florestal e do estoque de carbono como é o caso de sensores ópticos convencionais e RADAR. Neste cenário, Freitas e Shimabukuro (2007) destacam que estimativas feitas com os sensores de variados sistemas como: Landsat, SAR e LiDAR observaram que tanto Landsat como SAR tem alta saturação e superestimam valores de biomassa florestal, problema não observado na tecnologia LiDAR.

Os estudos, utilizando laser aerotransportado para estimar biomassa e estoque de carbono florestal, com base na distribuição da altura do dossel, baseiam-se na modelagem conforme as métricas LiDAR e, principalmente, dos percentis de altura e intensidade e variáveis de cobertura da copa. Nota-se que a regressão linear múltipla é a análise de regressão mais utilizada (NAESSET, 2004). Segundo Poeh et al. (2010) o uso de altura e cobertura da copa obtidas pelo processamento de dados LiDAR para os estudos de manejo e estimativa da biomassa aérea florestal, na Escócia. Os autores encontraram resultados satisfatórios que confirmam o grande potencial desta ferramenta para o estudo da biomassa.

3.5 PROJETO PAISAGENS SUSTENTÁVEIS

O projeto Paisagens Sustentáveis é uma parceria entre instituições nacionais e internacionais, dentre as quais NASA, Serviço Florestal Americano, Funarbe, Instituto Floresta Tropical, Serviço Florestal Brasileiro, Departamento de Estado Americano, Imazon, Embrapa, e a Universidade de Hampshire. Criado para desenvolvimento de novas metodologias e expansão do conhecimento, através de técnicas de contabilização de carbono no âmbito do REDD+, que além da proteção de milhões de hectares de floresta o projeto disponibiliza dados LiDAR da floresta amazônica. Essa tecnologia inovadora permite avaliar detalhadamente as áreas, fornecendo informações sobre a superfície do terreno, estrutura da vegetação e parâmetros para estoque de carbono.

De maneira geral, o programa visa um esforço mundial para redução do desmatamento e descaracterização de paisagens oferecendo prêmios financeiros aos países que se comprometerem a reduzir suas emissões criando um mecanismo de proteção e fomento às boas práticas nas atividades relacionadas ao meio ambiente. O principal objetivo é estruturar novas redes e parcerias entre instituições do setor, ampliando geração de informação que já é fornecida pela Embrapa. Esta parceria vai catalisar a capacidade do país no âmbito de extrapolação e contabilização do carbono e gases de efeito estufa (EMBRAPA, 2014).

Além disso, o projeto Paisagens Sustentáveis obteve, em dezembro de 2017, a liberação de mais 60 milhões de dólares que serão investidos em ações de sustentabilidade na Amazônia Legal (BANCO MUNDIAL, 2017). O Paisagens Sustentáveis da Amazônia, é uma nova fase do projeto, que é financiado pelo Fundo Mundial para o Meio Ambiente (GEF), e será coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em parceria com os órgãos vinculados e os governos do Acre, Amazonas, Rondônia e Pará. O foco é na gestão de unidades de conservação, além de aumentar as áreas de restauração e manejo sustentável na Amazônia. (MMA, 2017).

A quantificação da biomassa da vegetação é importante para compreensão dos fluxos de carbono, principalmente devido ao desmatamento e distúrbio nas florestas. Necessário para compreender a suscetibilidade das florestas às mudanças. Projetos para geração de créditos de carbono como por exemplo da modalidade REED geram demanda para a elaboração de métodos que quantifiquem o carbono estocado na vegetação (MYNENI et al, 2001; FOODY et al., 2003). Esses métodos ainda precisam ser confiáveis, replicáveis e auditáveis para estarem no padrão do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (ALLEY et al., 2007). O desenvolvimento da geotecnologia ou geoprocessamento no inventário florestal para a biomassa é essencial para se alcançar a qualidade esperada.

Dessa forma, observa-se que esses estudos podem vir a contribuir para a aprovação de atividades de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Assim, além dos benefícios ambientais, também serão promovidos benefícios econômicos, por meio dos créditos de carbono gerados em atividades de projetos em países em desenvolvimento, como o Brasil.

O acervo de dados de alta precisão disponibilizado pode ser utilizado para os mais diversos fins como: estudos de estrutura da floresta, cálculos de biomassa, estoque de carbono, avaliação os impactos do efeito estufa, entre outros. O WebGIS do projeto é o maior acervo de dados provenientes de levantamentos aerotransportado realizados com a tecnologia LiDAR do Brasil, bem como um enorme acervo de dados de inventários florestais localizados nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica (Paisagens Sustentáveis, 2014).

3.6 MODELAGEM

Um modelo é uma abstração ou uma representação simplificada de algum aspecto da realidade, uma ferramenta matemática para representação da dinâmica natural de um

povoamento florestal no processo indireto (MAESTRI, 1995). O autor destacou que a simulação de crescimento pode ser de uma árvore ou povoamento e permite análises de seu comportamento sob determinadas condições, e assim, auxiliam nas tomadas de decisão podendo tratar da estrutura ou de suas funções

Segundo Rossi (2007), o modelo pode envolver palavras, diagramas, mapas, equações, programas de computadores ou estruturas físicas para representar um sistema, mas os modelos não são capazes de fornecer completo entendimento sobre todas as questões que envolvem um sistema biológico pela sua complexidade. Equações são igualdades entre sentenças matemáticas e são compostas basicamente por variáveis e coeficientes, sendo que os coeficientes têm seus valores conhecidos, enquanto as variáveis podem assumir qualquer valor.

O processo de desenvolvimento de modelos, por sua vez, é um pré-requisito da simulação, pois com base nas informações em função de variáveis independentes, a definição de uma opção mais adequada ou ajustada de manejo pode ser mostrada e dentre outras diversas possíveis, pode ser a de melhor viabilidade (MAESTRI, 1995). No entanto, na área florestal, muitas relações dendrométricas são estudadas e passíveis de modelagem, a mais conhecida é a relação entre altura e o diâmetro e a partir destes diversos problemas florestais são resolvidos utilizando-se de relações matemáticas, que possibilitam obter estimativas através de equações de regressão (SCHNEIDER, 1997).

Para um conjunto de dados podem ser ajustados diversos modelos de regressão e a seleção de uma equação pode ser feita utilizando critérios estatísticos, como o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão da estimativa (S_{yx}), a distribuição dos resíduos e a estatística F (SCHNEIDER, 1997; BAYER et al., 2009). Segundo Finger (1992), o problema se resume em obter a expressão quantitativa de dependência entre uma variável de difícil medição, a variável dependente, e uma ou mais variáveis de fácil obtenção, as variáveis independentes.

Para Maestri (1995) o desenvolvimento científico na área de modelagem florestal, tem apresentado duas principais linhas filosóficas de abordagem do tema: modelos orientados ao manejo (descritivos, empíricos ou estatísticos), e os modelos baseados em processos biológicos. Segundo o autor, os cientistas de cada linha de abordagem normalmente trabalham separadamente, mas muitos especialistas vislumbram uma tendência futura de maior embasamento ecológico dos modelos descritivos e de maior aplicabilidade prática dos modelos processuais, ou seja, ferramentas híbridas são esperadas nessa área.

Também é importante salientar que modelos matemáticos de regressão podem ser lineares ou não lineares, de modo que os modelos lineares são aqueles cujos coeficientes

apresentam-se na forma aditiva ou subtrativa e elevados ao expoente unitário (DRAPER et al., 1981). Segundo Guimarães (2001), o ajuste de um modelo matemático de regressão, a um conjunto de dados obtidos experimentalmente, nada mais é do que encontrar os coeficientes da equação que melhor descreve o comportamento daquele conjunto de dados.

Segundo Amaro et al, (1997), modelos baseados em processos são também chamados de modelos mecanísticos ou modelos ecofisiológicos. Eles tratam de estimar o crescimento em volume, peso ou carbono de uma formação vegetal florestal em função do meio ambiente e de aspectos físicos ou ecológicos por incluir processos ou funções biológicas básicas na sua formulação, dotando-os de maior habilidade generalista.

Modelos que utilizam métricas LiDAR estão sendo testados no setor florestal, principalmente, na modelagem e estimativas em razão da velocidade da coleta dos dados e a abrangência de grandes áreas, possibilitando o processamento imediatamente após o voo. A precisão dos levantamentos, utilizando LiDAR, depende de várias características do sistema, tais como sensor utilizado, densidade de pontos, altitude da plataforma de voo, frequência dos pulsos, ângulo de varredura, entre outros, existem atualmente diversos trabalhos visando entender as influências nas estimativas de determinadas variáveis florestais (NAESSET,2009; GOBAKKEN,2008).

3.7 LINGUAGEM R

A linguagem R é considerada uma excelente ferramenta para manipulação e tratamento de dados, capaz de realizar modelagem não linear, testes clássicos, análise de séries temporais, entre outras. Sendo um software livre sob os termos da *Free Software Foundation's* e licença aberta *General Public License* (GPL) distribuído também na forma de código fonte e multiplataforma se torna potencialmente relevante na área acadêmica e científica.

A linguagem R pode ser estendido facilmente via pacotes ou bibliotecas, compreendendo pacotes básicos (pacotes básicos nativos ou que fazem parte do núcleo básico) disponíveis para download, além de inúmeros pacotes implementados pelos usuários com funções específicas para as mais variadas finalidades, disponíveis no CRAN (*Comprehensive R Archive Network*) (CORE, 2017).

O ambiente de programação possui ainda uma gama de outros pacotes que são capazes de trabalhar com dados espaciais, a exemplo o pacote *sp*, que foi desenvolvido com a

finalidade de análises de dados espaciais, servindo como uma importante ferramenta. Outras bibliotecas voltadas a dados de sensoriamento e sistemas de informações geográficas podem ser citadas: *maptools*, *rgdal*, *splancs*, *geoR*, *gstat*, *spsurvey*, *trip*, *lidR*, dentre outros.

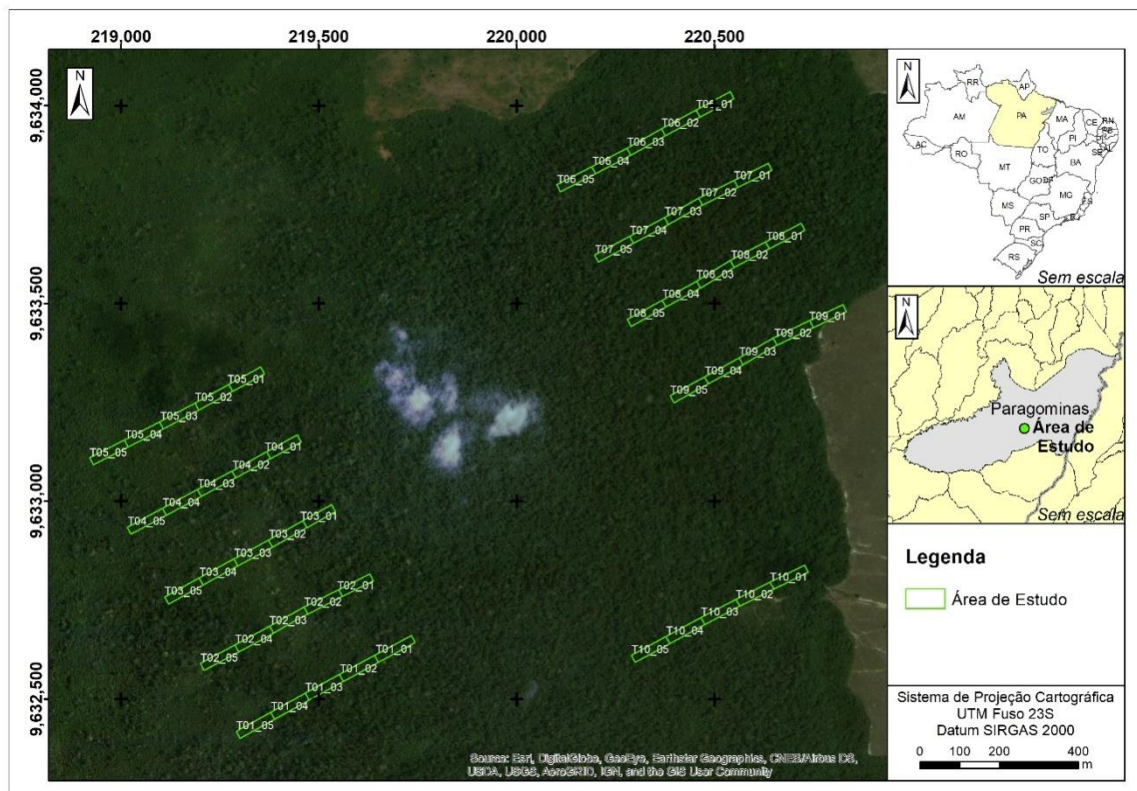
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Paragominas foi fundado em 4 de janeiro de 1965 (IDESP, 1977) e está situado no nordeste do Estado do Pará, na zona fisiográfica Guajarina, às margens da rodovia BR010 (BASTOS et al.,1993). Segundo IBGE (1991) e Leal (2000) a área do município é de aproximadamente 19.300 km², com uma população estimada de entorno de 103 mil habitantes (IBGE, 2013).

A área de estudo, a Fazenda Nova Neonita, se localiza no município de Paragominas, Noroeste do estado do Pará. Esta fazenda é uma propriedade privada, sem histórico recente de uso da terra nem de exploração madeireira, não existindo estradas na fazenda até a década de 80. A Figura 3 mostra a localização da fazenda e as parcelas onde foi realizado o inventário florestal na área do projeto.

Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo com as parcelas do inventário



Fonte: Autor.

A exploração dos recursos madeireiros e principalmente atividades de agricultura e pecuária são as principais responsáveis pela mudança do quadro social na região Amazônica, Paragominas não é exceção. No entanto, a economia local veio a se desenvolver na década de 1980 onde houve realmente uma consolidação social muito pelas indústrias madeireiras e extrativismo. O setor florestal tem papel importante e chega a ter destaque no desenvolvimento econômico e social, concentrando empresas dos mais variados segmentos, mas a maioria voltadas a exploração de madeira e extrativos (LEAL, 2000).

Paragominas faz parte da fronteira de ocupação antiga da Amazônia, desse modo, passou por vários ciclos de ocupação, agricultura de corte e queima, seguido da pecuária e depois pela atividade madeireira (ALMEIDA e UHL, 1998). Atualmente, o município possui uma economia diversificada com base na agropecuária (em parte intensiva), setor madeireiro (com expressiva área sob manejo florestal), além da mineração (bauxita) e atividades de reflorestamento (exóticas e nativas) (PINTO et al., 2009).

No Passado, Paragominas chegou a ser incluída na lista dos 36 municípios que mais desmataram a Amazônia, para ser retirada da lista o município teria que reduzir o desmatamento para menos de 40 km²/ano e realizar o CAR (Cadastro Ambiental Rural) das propriedades rurais (BRASIL, 2008). Com a cooperação entre Prefeitura de Paragominas, Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Pará (SEMA-PA) e diversas outras organizações, em 2010, o município foi retirado da lista.

Já na década de 90 com a intensificação da fiscalização houve um decréscimo no desmatamento a níveis muito baixos se comparado a décadas anteriores, alavancando assim as ações de manejo sustentável e de substituição de culturas nativas por culturas de rápido crescimento, sendo estas utilizadas como energia (LEAL, 2000). O autor destaca que algumas empresas do setor estão investindo em treinamento e conservação aliado ao manejo sustentável com o intuito de obter certificação junto aos órgãos de controle, pois garante que toda a gestão da empresa está preocupada com o meio ambiente e tem acesso ao mercado exterior para seus produtos

4.1.1 Clima

A região de Paragominas possui clima Aw segundo a classificação de Köppen, sendo este tropical chuvoso, quente e com estação seca bem definida. A média anual de temperatura

é de 27°C, as chuvas são bem distribuídas com média anual de aproximadamente 2.200mm e a umidade relativa do ar em média de 80% (WATRIN e ROCHA, 1992).

4.1.2 Geomorfologia e Hidrologia

As áreas do município em sua maioria apresentam topografia que vai de plana a suavemente ondulada, sendo identificada como pertencente à Região Geomorfológica Planalto Setentrional Pará-Maranhão que é caracterizada por ter uma superfície plana com cortes abruptos na ocorrência dos rios (BRASIL, 1973).

As cores predominantes na maioria dos solos são amarelas e vermelhas provenientes de arenitos que em geral são caulínicos. Esta formação constitui o topo de planaltos que desaguam no rio Capim onde as águas escoam em direção ao litoral, os depósitos aluvionares são constituídos por areias, argilas e cascalhos (BRASIL, 1973).

Duas grandes bacias abrangem o município, a do rio Capim e a do rio Gurupi, ambas possuem subdivisões em bacias menores e no caso da bacia do rio Gurupi divisa entre os estados do Pará e Maranhão (WATRINE ROCHA, 1992).

4.1.3 Solos

O município tem como classes de solos predominantes Latossolos e Argissolos (BRASIL, 1973; SILVA, 1997). Os Latossolos amarelos são a maioria, com características tipicamente propícias para existência de grandes maciços florestais nativos, como elevada profundidade, boa drenagem e permeabilidade (BRASIL, 1973). Segundo Silva (1997), os Latossolos possuem em suas características baixa fertilidade, são solos que tem sua origem em minerais não hidromórficos. O autor descreve que não é comum encontrar Latossolos com baixa permeabilidade devido à vastidão de seus horizontes e o tipo de formação.

4.1.4 Vegetação

As florestas são em sua maioria tropicais densas de terra firme e perenes, porém, devido o avanço do desmatamento na região provocado pela agropecuária, grandes áreas de floresta original foram substituídas por florestas secundárias, em diversos estágios de desenvolvimento (PARÁ, 2008). Este histórico econômico resultou em uma grande área

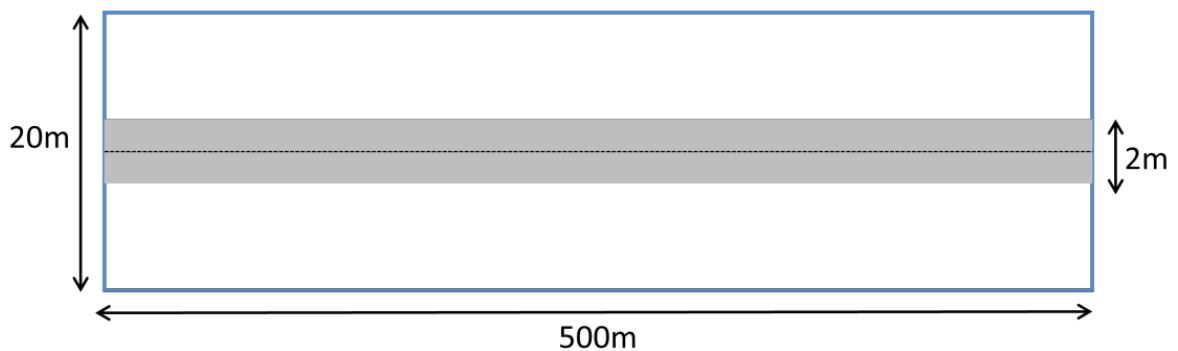
desmatada e florestas degradadas que abrangeram 45% da área total do município (PINTO et al., 2009).

As características da vegetação da região de acordo com VELOSO et al. (1991), pode ser separada em 3 grandes grupos com particularidades ecológicas distintas, a floresta ombrófila aberta mista, floresta ombrófila densa e floresta ombrófila densa aluvial. A tipologia florestal predominante na área de estudo, a Fazenda Nova Neonita, é a floresta ombrófila densa (LBA-ECO Investigations, 2014).

4.2 INVENTÁRIO FLORESTAL

O inventário florestal foi realizado pelo Instituto Floresta Tropical (IFT), e os dados foram disponibilizados na base de dados no site do Projeto Paisagens Sustentáveis. O levantamento aconteceu no período de 09/03/2013 a 25/04/2013 considerando a metodologia da amostragem casual simples, com parcelas de áreas fixas, conforme proposto por Soares et al. (2011). São 10 parcelas de 20m x 500m com subparcelas de 2 m x 500 m ao centro criadas para avaliação da regeneração das áreas (Figura 4).

Figura 4 - Parcela do inventário realizado na área de estudo



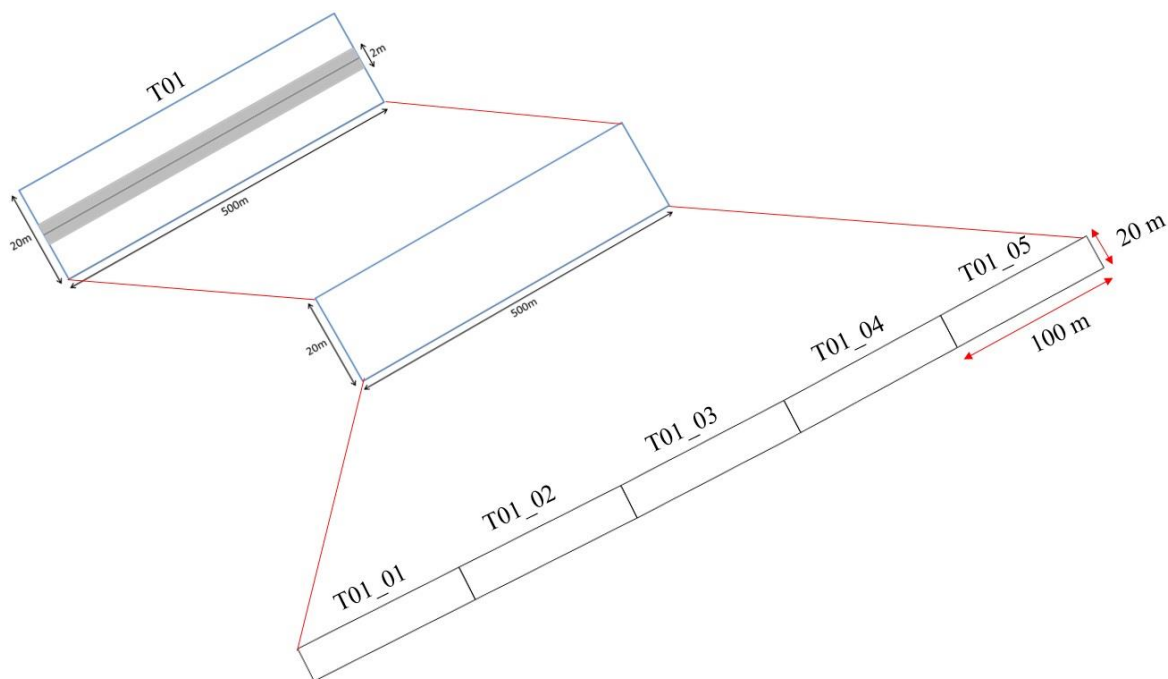
Fonte: Adaptado de Paisagens Sustentáveis (2014).

Os 10 transectos iniciais foram subdivididos em cinco parcelas (Figura 5), totalizando 50 parcelas de 20 x 100 m, as sub-parcelas de 2 m da regeneração foram removidas. No campo, os vértices das parcelas foram registrados com tecnologia de por satélite. O inventário

amostrou as árvores vivas com diâmetro na altura do peito (DAP) igual ou superior a 35 cm, as quais foram identificadas por pesquisadores do Instituto Floresta Tropical.

As parcelas ou áreas dos transectos foram delimitadas e os dados levantados por inventário, posteriormente os dados foram disponibilizados em *shapefile* para a utilização em *softwares* de geoprocessamento. Estão disponíveis também parcelas com dados individuais das árvores na tabela de atributos contendo várias informações a respeito.

Figura 5 - Divisão do transecto em cinco parcelas.



Fonte: Adaptado de Paisagens Sustentáveis (2014).

No total das parcelas foram identificadas 628 árvores pertencentes à 37 famílias botânicas de 81 espécies. Na Tabela 1 estão alguns dados a respeito das áreas.

Continua...

Tabela 1 - Variáveis dendrométricas obtidas do inventário florestal

Maior DAP (cm)	87,3 cm
Menor DAP (cm)	10 cm
DAP médio (cm)	36,62 cm
Maior Altura Total (m)	39,91 m

Menor Altura Total (m)	0,8 m
Altura Total Média (m)	32,5 m
Maior Densidade (g/cm ³)	1,06 (g/cm ³)
Menor Densidade (g/cm ³)	0,26 (g/cm ³)
Densidade média (g/cm ³)	0,59 (g/cm ³)

Fonte: Adaptado de Paisagens Sustentáveis (2014).

As variáveis coletadas a campo foram registradas em fichas de campo e posteriormente colocados no arquivo digital, disponibilizado juntamente com os dados do levantamento a laser, com as seguintes informações:

Nome Comum (common name), Nome Científico (scientificname), Família (familyname), Densidade (WSD), DAP (DBH), Tipo (type), Copa (canopy), Luz (Light), Morta (Dead), Classe de Diâmetro (D class), Altura Comercial (Hcom), Altura Total (Htot), Raio Norte (RN), Raio Sul (RS), Raio Leste (RL), Raio Oeste (RO), Data (Date), Coordenada UTM Leste (UTM Easting) e coordenada UTM Norte (UTM Northing).

A partir da exportação da tabela de atributos foi possível a criação de um arquivo em formato de container no Quantum GIS e exportar na tipologia *comma-separated values* (.csv), com os dados espacializados de todas as árvores inventariadas que posteriormente foram carregadas para processamento no *software* RStudio.

A biomassa (kg/ha) foi calculada usando a Equação 1, ajustada para a região de florestas tropicais em geral abastecida pelo método direto de Chave et al., 2015.

Equação 1 – equação pantropical ajustada pelo método direto de Chave et al., 2015.

$$AGB = e^{(-1,803 - 0,976 (E) + 0,976 * \ln(P) + 2,673 * \ln(DAP) - 0,0299 * \ln(DAP)^2)} \quad (1)$$

Em que:

ln: Logaritmo neperiano;

E: Stress ambiental (-0,103815)

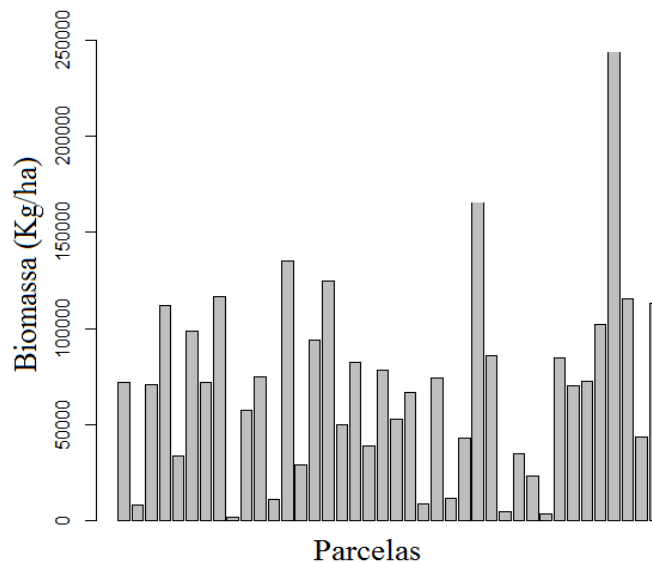
DAP: Diâmetro a 1,30 (m);

P: Densidade específica (g/cm³).

A variável stress ambiental (E) é um fator criado para agregar informações de temperatura, precipitação ou algum stress por falta de água, dados foram coletados de diversas estações climáticas das regiões estudadas até chegar a um número adaptado para cada região.

Na sequência, com os dados gerados a partir da equação foram plotados os valores referentes as parcelas com intuito de mostrar a variação naintensidade para visualização dos dados gerados nas 50 parcelas, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Gráfico de intensidade para os valores calculados, por parcela



Fonte: Autor.

Na Figura 6, é possível ainda observar diferentes comportamentos quanto à biomassa e sua distribuição nas parcelas em análise. Esse padrão é esperado para florestas naturais e inequiâneas, com elevado número de indivíduos nas classes de menores diâmetros (regeneração), com um decréscimo exponencial no número de indivíduos de maiores diâmetros. No inventário florestal do projeto entraram em maior número as árvores de menor diâmetro (10 cm), quando comparado a valores de diâmetro de 35 cm, mostrando a diversidade diamétrica da floresta.

4.3 OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS LIDAR

Os dados LiDAR utilizados pertencem ao Projeto Paisagens Sustentáveis e foram obtidos a partir de um voo em julho de 2013 sobre a Fazenda Nova Neonita. Os dados cobrem

áreas de floresta nativa, que não sofreram degradação florestal, cobertura nos anos de 2013 a 2014, cobrindo uma área de 1.000 hectares.

Os dados consistem em uma nuvem de pontos obtidas por perfilamento a laser aerotransportado, disponíveis nos metadados do projeto Paisagens Sustentáveis. Não constam informações da plataforma aérea utilizada e as características do sensor estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Características específicas do sensor LiDAR

Característica	Dado
Equipamento	Optech Orion 09SEN243
Data de Aquisição	18/06/2014
Altitude Máxima de Vôo	850 m
Campo de Visada	11°
Frequencia de pulso	67,5 Hz
Densidade Média Primeiro Retorno	17 ppm ²
Densidade Média de Retornos	40 ppm ²
Área cobertura	1000 ha

Fonte: Adaptado de Paisagens Sustentáveis (2014).

Os dados foram disponibilizados via WEBGIS na forma de nuvem de pontos já acompanhados do Modelo Digital do Terreno (MDT) dela derivado. Os limites das áreas e as datas de levantamento foram obtidos nos metadados contidos no site Paisagens Sustentáveis.

Os dezenove arquivos no formato (.las) foram fornecidos mediante cadastro no site de forma gratuita e foram processados de modo a gerar superfícies matriciais contínuas para toda a área de estudo. Os dados foram processados no aplicativo *FUSION/LDV* (MCGAUGHEY, 2014) versão 3.6, desenvolvido e disponibilizado de forma gratuita pelo Serviço Florestal Norte Americano.

As etapas do processamento no *FUSION/LDV* estão descritas previamente, e constituem as fases após a inserção da informação, até a geração do arquivo final com as informações (métricas) contidas nos arquivos processados.

A) TIN (*Triangular Irregular Network*);

É uma pré-etaapa do processamento, pois, é o método de interpolação do algoritmo na construção do MDT e CHM, ela classifica os pontos em pertencentes ao terreno ou não pertencentes ao terreno pela cota mais baixa da nuvem de pontos.

A análise inicial do processamento dos dados LiDAR está demonstrada na Tabela 3. Observa-se que todos os pontos da área de estudo foram classificados. Do mesmo modo, não se identificou a presença de benfeitorias, ruído e água.

Tabela 3- Análise descritiva dos dados no processamento da nuvem de pontos

Valor da Classe	Retornos	Interpretação
0	0	Created, Never Classified (Criado, Não Classificado)
1	0	Unclassified (Não Classificado)
2	5.506.741	Ground (Solo)
3	10.931.351	Low Vegetation (Vegetação Baixa)
4	16.429.179	Medium Vegetation (Vegetação Média)
5	224.379.150	High Vegetation (Vegetação Alta)
6	0	Building (Benfeitoria)
7	0	Low Point (Ruído)
8	0	Water (Água)

Fonte: Adaptado de Paisagens Sustentáveis (2014).

C) *Groundfilter*

Nesta etapa, os pontos do terreno são refinados baseada na interpolação polinomial que utiliza um algoritmo para filtragem, desenvolvido por Kraus e Pfeifer (1998). É a etapa que filtra a classificação dos pontos referentes ao terreno.

D) Modelo Digital de Superfície (MDS)

Os modelos digitais de superfície são representações gráficas de feições na superfície terrestre, contendo árvores, construções e demais objetos juntamente com o terreno. MDS como sendo um modelo digital de elevação (MDE – *Digital Elevation Model*) juntamente com as formas das feições da superfície da terra.

E) Modelo Digital da Altura das Copas (CHM);

Ele representa a diferença entre um Modelo de Digital do Terreno e um Modelo de Digital de Superfície e fornece a altura dos objetos (em uma floresta, as árvores), que estão sobre a área em questão.

F) Recorte das Parcelas (*PolyclipData*);

Como o próprio nome já diz, consiste em recortar a nuvem de pontos somente com as áreas de interesse. Para isso foi utilizado um *shape file* previamente editado contendo as 50 parcelas e posteriormente utilizado no recorte, resultando no recorte da nuvem original de pontos preparando os dados para a *Cloudmetrics*.

G) Métricas da nuvem de pontos LiDAR (*Cloudmetrics*).

O resultado do processamento ao seu final gerou um arquivo (.CSV) com as métricas LiDAR das 50 parcelas, contendo variáveis de Cobertura, Elevação e Intensidade com os seus respectivos valores.

Variáveis de Cobertura:

Total return count, Total return count above 2.00, Return 1 count above 2.00, Return 2 count above 2.00, Return 3 count above 2.00, Return 4 count above 2.00, Return 5 count above 2.00, Return 6 count above 2.00, Return 7 count above 2.00, Return 8 count above 2.00, Return 9 count above 2.00, Other return count above 2.00.

Variáveis de Elevação:

Elev minimum, Elev maximum, Elev mean, Elev mode, Elevstddev, Elev variance, Elev CV, Elev IQ, Elev skewness, Elev kurtosis, Elev AAD, Elev MAD median, Elev MAD mode, Elev L1, Elev L2, Elev L3, Elev L4, Elev L CV, Elev L skewness, Elev L kurtosis, Elev P01, Elev P05, Elev P10, Elev P20, Elev P25, Elev P30, Elev P40, Elev P50, Elev P60, Elev P70, Elev P75, Elev P80, Elev P90, Elev P95, Elev P99, Canopy relief ratio, Elev SQRT mean SQ, Elev CURT mean CUBE.

Variáveis de Intensidade;

Int minimum, Int maximum, Int mean, Int mode, Intstddev, Int variance, Int CV, Int IQ, Int skewness, Int kurtosis, Int AAD, Int L1, Int L2, Int L3, Int L4, Int L CV, Int L skewness, Int L kurtosis, Int P01, Int P05, Int P10, Int P20, Int P25, Int P30, Int P40, Int P50, Int P6.

As variáveis geradas resultando deste processamento, com o resultado dos procedimentos descritos acima, obteve-se um total de 92 variáveis. Cada uma delas está descrita a seguir e uma informação mais detalhada se encontra em anexo I.

4.4 MODELAGEM DA BIOMASSA

No tratamento estatístico inicial, procedeu-se com o desenvolvimento da análise de correlação entre os dados de biomassa e as métricas obtidas dos dados LIDAR.

A correlação tem por finalidade valorar a associação linear entre variáveis, que também é conhecido na estatística como coeficiente de correlação (WATZLAWICK et al., 2004). O coeficiente pode variar entre -1 a 1, porém correlação negativa ou positiva indica ainda que tem correlação, e a ausência é representada pelo valor intermediário a -1 e 1 sendo esse representado pelo algarismo 0.

Após a análise de correlação simples, procedeu-se com o sorteio das parcelas que foram utilizadas na modelagem e as parcelas que foram utilizadas na validação do modelo de regressão. Foram usadas 80% das parcelas, ou seja, 40 parcelas para a modelagem e 20% ou 10 parcelas para a validação do modelo de estimativa.

As métricas foram testadas quanto a normalidade, homocedasticidade de variância e independência dos resíduos, com a finalidade de verificar as condicionantes de regressão.

A) Normalidade dos resíduos: a normalidade dos resíduos pode ser analisada de diferentes maneiras, neste estudo foi analisado por um histograma que deve possuir tendência normal, pela análise gráfica dos resíduos e valores ajustados em que os pontos devem estar dispostos aleatoriamente.

B) Homocedasticidade: A verificação desta condição foi realizada por análise gráfica dos resíduos da regressão *versus* os valores estimados da variável dependente. O gráfico deve apresentar pontos dispostos aleatoriamente, sem nenhum padrão definido.

C) Resíduos independentes: Os resíduos devem estar distribuídos de forma aproximada a uma distribuição normal.

Para tal, foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk, White e Durbin-Watson, e após passados os testes de condicionantes, procedeu-se com as 39 variáveis que foram aprovadas nos testes.

Na sequência, a análise de regressão foi empregada com o propósito de determinar quais são as variáveis provenientes do levantamento a laser melhor estimam a biomassa florestal estocada nas parcelas de campo. Desse modo, optou-se por ajustar modelos de regressão visando estimar essa variável por meio do processo indireto.

Este método tem por objetivo selecionar as variáveis que mais contribuem, bem como os melhores métodos de acordo como critério AIC (Critério de Informação de Akaike). O modelo mínimo ou inicial é representado pelo intercepto e cada variável independente é testada quanto a sua entrada ou não no modelo, sua entrada ocorre se o valor do AIC relacionado a ela for menor em relação às demais e, ainda, se o valor do AIC do modelo geral diminuir com sua entrada.

Utilizou-se o método de seleção de variáveis ou *stepwise*, neste método são selecionadas as variáveis que mais contribuirão ao modelo proposto, já que este permite examinar a contribuição de cada variável independente para o modelo de regressão (HAIR et al., 2006). Assim, o método seleciona apenas as variáveis com contribuição significativa para o modelo de regressão, de acordo com um nível de significância (WATZLAWICK et al., 2009). No trabalho o valor de significância utilizado foi de 5% na inclusão de variáveis no modelo e de 10% para removê-las.

Examinou-se relações entre a biomassa e os dados de laser com análise de regressão linear múltipla, considerando cada parcela. Os modelos de estimativa de biomassa foram testados baseando-se nas métricas do laser aerotransportado, para os quais foram extraídos da nuvem em cada unidade amostral. Desta forma, todas as variáveis do LiDAR puderam entrar no modelo como variável independente e a biomassa como variável dependente.

Para a escolha da equação que melhor se ajustou aos dados, procedeu-se com a avaliação do comportamento dos modelos matemáticos selecionados. Assim, levou-se em consideração os critérios estatísticos: erro padrão da estimativa ($Syx\%$), coeficiente de variação ($CV\%$), coeficiente de determinação (R^2), eficiência (E) e índice de tendência absoluta (BIAS), com validação pelo teste de *Student* (t) com o nível de significância de 5% de probabilidade.

Por fim, a validação dos modelos que melhor representaram a estimativa de biomassa da área de estudo e com base na validação houve a escolha do melhor modelo nos *scores* estatísticos e na análise de regressão, segundo os critérios estabelecidos anteriormente.

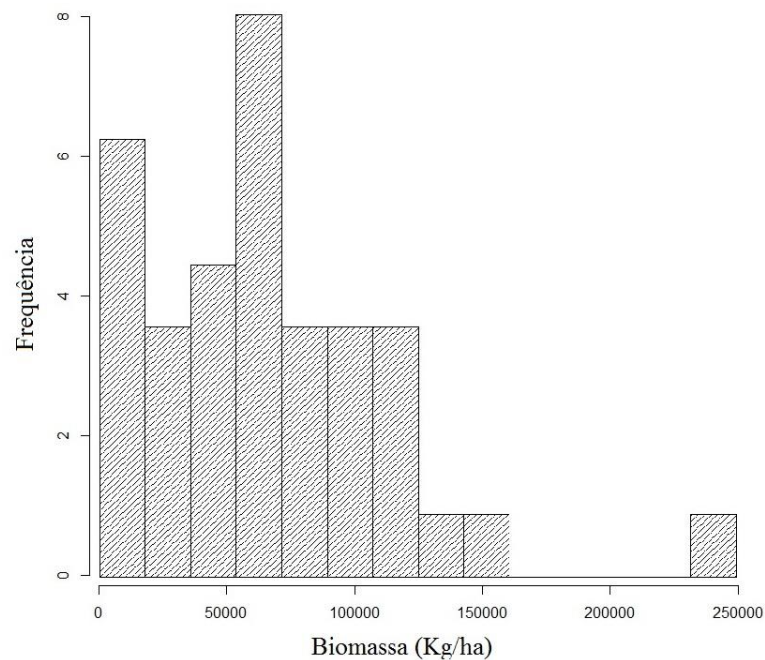
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DADOS DE INVENTÁRIO

Uma possível explicação para o padrão encontrado nos dados é a mudança da comunidade vegetal ao longo do desenvolvimento sucessional do fragmento e adaptação dessa comunidade às condições microclimáticas da borda. Nos fragmentos jovens, as espécies pioneiras são mais abundantes do que nos fragmentos antigos. Deste modo a variabilidade existente nos dados estaria mostrando uma mudança não só pela variabilidade natural, mas também em virtude do efeito de borda.

Neste caso foi desenvolvido em forma de gráfico de barras, o qual mostra a variação sobre uma faixa específica, possibilitando expor e conhecer as características do processo envolvendo os valores calculados de biomassa via inventário, além de permitir ter uma visão geral da variação desse conjunto de dados por classe de frequência, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Histograma de frequência das classes



Fonte: Autor.

Pode ser observado um histograma muito heterogêneo, assimétrico, pois ele apresenta uma frequência sem seguir os padrões comumente encontrados em outros trabalhos que seriam de J invertido ou mais alta no centro e que vai diminuindo conforme se aproxima das bordas, representando assim um processo de estabilização das frequências que caracterizaria uma distribuição normal.

Essa variabilidade foi encontrada no trabalho de Barlow et al. (2012), e pode ter sua explicação relacionada com o menor número de árvores nessas classes de diâmetro e, com isso, há uma redução nas parcelas que tem mais regeneração e poucos indivíduos de grande porte. Outro fator que pode ter influenciado esses resultados, é o fato de que em algumas parcelas pela própria composição florística da floresta ombrófila densa, árvores de subosque recebam mais energia solar em detrimento a outras reforçando a possibilidade de ocorrência do efeito de borda.

5.2 ESTOQUE DE BIOMASSA VIA LASER AEROTRANSPORTADO

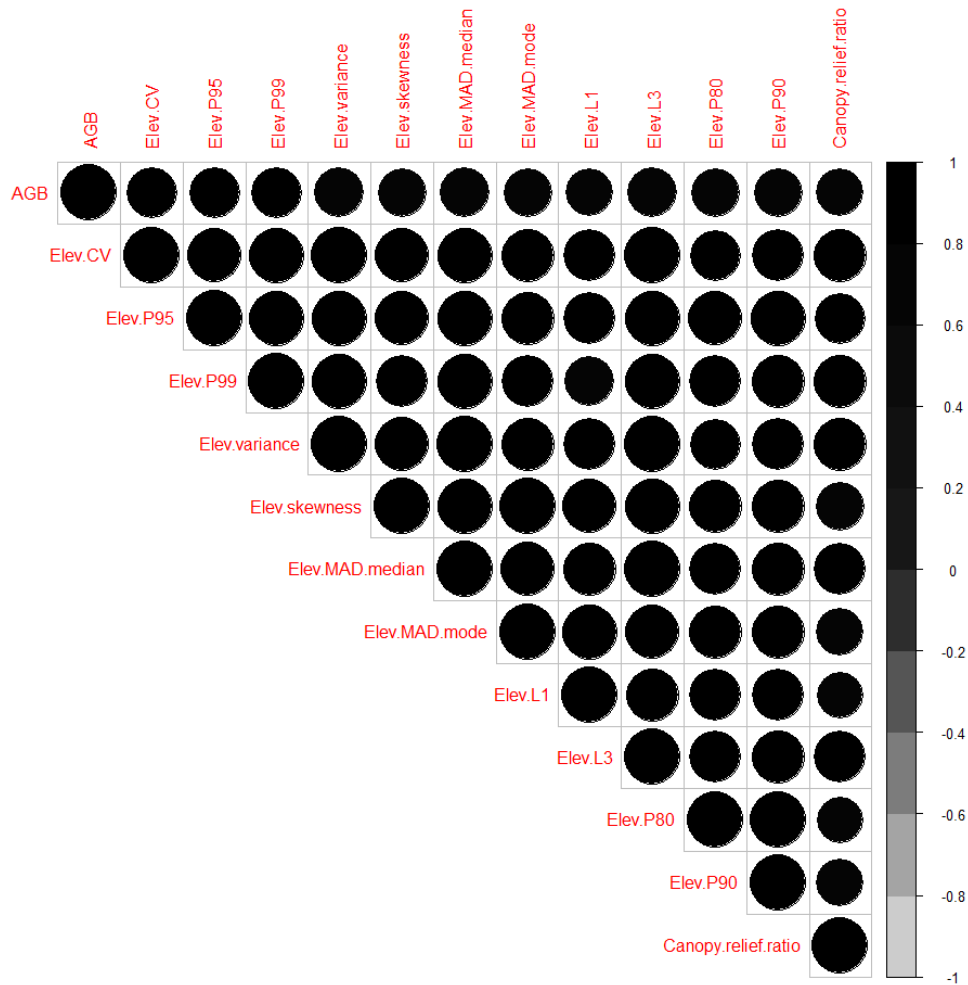
O LiDAR é uma tecnologia que se destaca para a estimativa da biomassa florestal na escala da paisagem (ASNER et al., 2014; BABCOCK et al., 2016; LEITOLD, 2014; PALACE et al., 2015; SAWADA et al., 2015) e na escala de indivíduo (MASCARO et al., 2011; ZOLKOS et al., 2013). Neste estudo, os dados de LiDAR permitiram a obtenção de dados de parâmetros estruturais da floresta, como a altura, a AGB e as áreas das árvores emergentes de florestas heterogêneas e complexas como a Amazônia.

O uso de ALS para estimar a biomassa das florestas é estudado a vários anos. A maioria desses estudos seguem duas formas ou ela é feita por árvore individual, ou ainda por paisagem a nível regional. Alguns desses estudos servem de base para os atuais

5.3 MODELAGEM DA BIOMASSA

Na análise de correlação, com intuito de investigar a possível relação existente entre o biomassa de campo e dados de laser aerotransportado, aplicou-se a correlação de Pearson (r), visando elucidar a magnitude das correlações, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Gráfico da correlação de Pearson somente com variáveis acima de 0,7



Fonte: Autor.

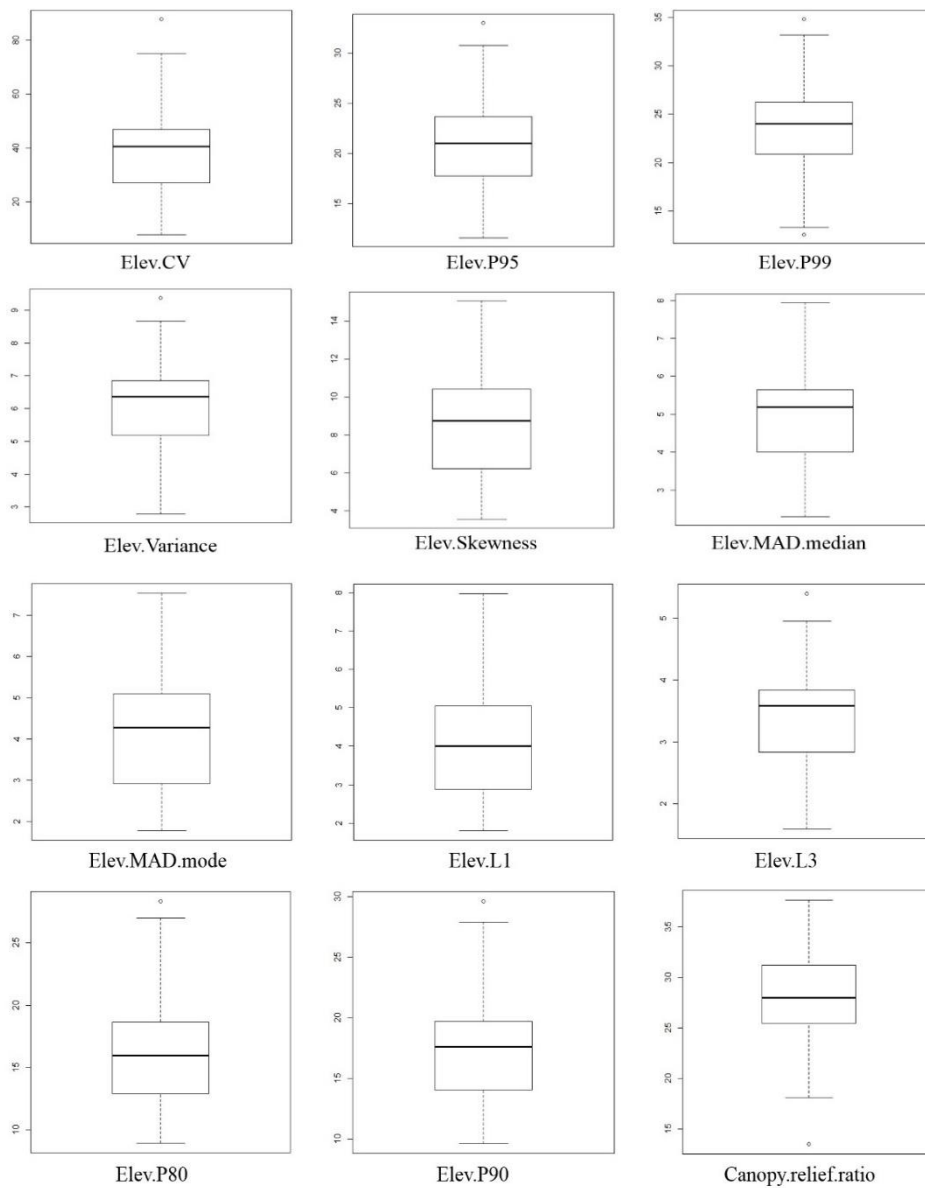
Os valores da correlação linear de Pearson foram superiores a 70% para as 12 variáveis, demonstrando uma alta correlação entre os valores estimados e observados. Este parâmetro estatístico foi similar aos encontrados nos trabalhos envolvendo modelagem das métricas LiDAR por regressão linear múltipla para estimar biomassa florestal e estoque de carbono acima do solo.

Na análise de correlação foram selecionadas 12 variáveis como sendo de Alta correlação com a biomassa. Observa-se que as métricas Elev.L1, Elev.P80 e Elev.skewness, são as de menor correlação com a variável Canopy.relief.ratio, a variável está relacionada a copa das árvores, todas as variáveis apresentaram boa correlação com a biomassa, em que com o aumento dos valores de biomassa ocorre a aumento também dos valores dessas variáveis, todas as correlações foram positivas. Entretanto, as variáveis

Elev.P99, Elev.MAD.Mode, Elev.P95, e Elev.P80 demonstram valores próximos a 90% de correlação com a biomassa acima do solo estimada por meio de dados LiDAR.

A Figura 9 demonstra a análise gráfica dos dados quantitativos expressos pelas variáveis selecionadas. Destaca-se que as variáveis Elev.P99 e Canopy.relief.ratio apresentaram os menores desvios, quando comparadas as demais variáveis.

Figura 9 - Box plot das variáveis melhor correlacionadas com a biomassa



Fonte: Autor.

A Tabela 4 demonstra a análise quantitativa das variáveis selecionadas, em que é possível observar grande variabilidade entre os dados, onde as elevações em percentis (Elev.P80, Elev.P90, Elev.P95, Elev.P99) e Canopy.relief.ratio tem valores elevados quando comparado as demais variáveis como Elev.CV, Elev.variance, Elev.MAD.Median, Elev.skewness, Elev.MAD.mode, Elev.L1, Elev.L3 por serem critérios estatísticos associados a variáveis de elevação.

Tabela 4 - Valores dos Box plots das 12 variáveis selecionadas

Métrica	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
Elev.CV	7,77	27,0	40,5	38,6	46,1	87,9
Elev.P95	11,59	17,8	21,0	20,8	23,7	33,0
Elev.P99	12,57	21,1	24,0	23,4	26,2	34,8
Elev.variance	2,79	5,2	6,4	6,0	6,8	9,4
Elev.skewness	3,57	6,3	8,7	8,4	10,4	15,1
Elev.MAD.median	2,30	4,0	5,2	4,9	5,6	7,9
Elev.MAD.mode	1,79	2,9	4,3	4,0	5,1	7,5
Elev.L1	1,81	2,9	4,0	4,1	5,0	8,0
Elev.L3	1,60	2,8	3,6	3,4	3,8	5,4
Elev.P80	8,93	13,0	16,0	16,2	18,6	28,4
Elev.P90	9,63	14,2	17,6	17,4	19,7	29,6
Canopy.relief.ratio	13,52	25,5	28,0	27,8	31,2	37,7

Fonte: Autor.

Após a análise de correlação simples ou correlação de Pearson, das 39 variáveis que atenderam aos testes de condicionantes e tiveram seus valores de correlação $\geq 0,7$ somente 12 tiveram “alta correlação” foram testadas na modelagem quanto a inclusão no modelo via *stepwise*.

Na estimativa *stepwise*, foi possível verificar pela análise estatística quais as variáveis foram selecionadas e seu respectivo nível de significância. A Tabela 5, mostra um resumo dos resultantes da regressão para as variáveis: Elev.P99, Elev.MAD.mode e Elev.CV, Elev.L3 com 99,9% e 95% de significância respectivamente.

Tabela 5 - Variáveis selecionadas pela *Stepwise* na análise de regressão

Continua...

Variáveis	Erro Padrão da estimativa	Valor t	Pr (t)
-----------	---------------------------	---------	------------

Intercepto	29692	0,622	0,53766	
Elev.CV	4738	3,228	0,00271	**
Elev.P99	10147	2,561	0,01492	*
Elev.MAD.mode	27787	2,357	0,02417	*
Elev.L3	-145412	-2,881	0,00673	**

Fonte: Autor.

* Nível de confiança ao nível de 1%; ** Nível de confiança ao nível de 5%.

Em que:

Elev.CV = Coeficiente de variação Elevação;

Elev.P99 = Elevação a 99%;

Elev.MAD.mode = Média dos desvios absolutos gerais da Elevação;

Elev.L3 = Elevação no momento - L3.

Desta forma, com as variáveis de maior correlação foram testados seis modelos diferentes e analisados segundo critérios estatísticos, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Equações testadas para as métricas melhor correlacionadas

MODELO	EQUAÇÃO
1	$288,6(Elev. CV) - 433,9(lev. L3) + 21,96(Elev. MAD. mode) + 17,30(Elev. P99)$
2	$288,6(Elev. CV)Elev. P99$
3	$288,6e^{-433,9(Elev. P99)}$
4	$288,6(Elev. MAD. mode) - 433,9(Elev. P99)^2$
5	$288,6(Elev. L3) - 433,9(Elev. MAD. mode)^2 + 21,96(Elev. P99)^3$
6	$288,6(Elev. CV) - 433,9(Elev. L3)^2 + 21,96(Elev. MAD. mode)^3 + 17,30(Elev. P99)^4$

Fonte: Autor

Para embasar a escolha da melhor equação relacionada a estes dados, procedeu-se com um ranqueamento para avaliação do comportamento e ajuste dos modelos matemáticos descritos (Tabela 7). Assim, levou-se em consideração os critérios estatísticos: erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx%), coeficiente de variação em porcentagem (CV%), coeficiente de determinação (R²), eficiência (E) e tendência absoluta (BIAS).

Tabela 7 - Ranqueamento dos modelos segundo critérios estatísticos

Modelo	Syx%	CV%	R²	E	BIAS	Soma
Modelo 1	28,24	37,97	0,75	-0,89	1445,31	12
Modelo 2	29,03	39,03	0,70	0,91	950,18	24
Modelo 3	28,71	38,60	0,71	0,92	-693,30	16
Modelo 4	28,89	38,84	0,71	0,94	0,013	18
Modelo 5	28,86	38,80	0,72	0,98	0,0002	14
Modelo 6	26,99	36,29	0,76	0,99	-0,00005	5

Fonte: Autor.

Os estatísticos critérios apontaram o Modelo 6 como sendo o melhor, seguido pelo Modelo 1, Modelo 5, Modelo 3, Modelo 4 e Modelo 2 respectivamente.

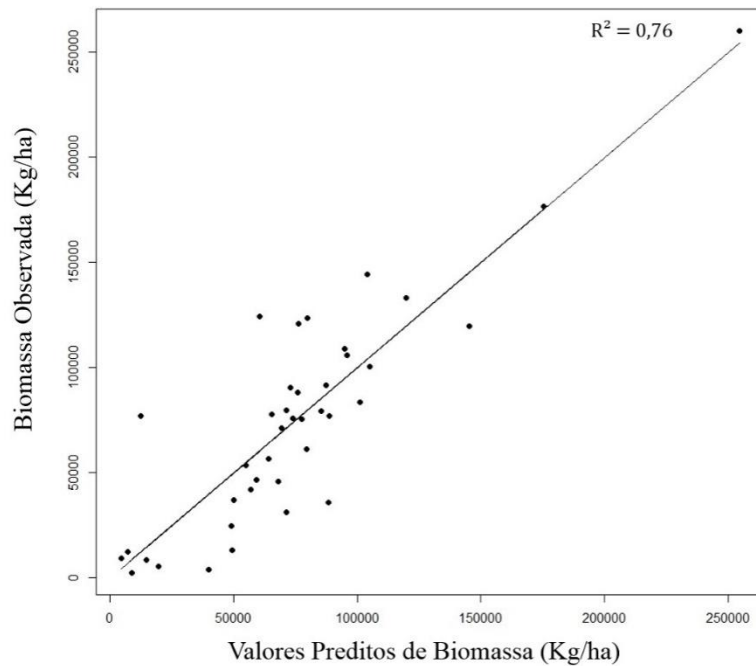
Analisando os parâmetros estatísticos, verifica-se que os modelos se ajustaram bem aos dados observados. Em relação aos coeficientes de determinação (R^2), as variáveis independentes apresentam um poder explicativo do comportamento da variável dependente, estoque de biomassa, entre 70% e 76%. Os valores da correlação linear de Pearson foram de 70% até e 90%, demonstrando uma alta correlação entre os valores estimados e observados.

Estes parâmetros estatísticos dos modelos ajustados foram similares aos encontrados nos trabalhos envolvendo modelagem das métricas LiDAR por regressão linear múltipla para estimar biomassa florestal e estoque de carbono acima do solo. Os coeficientes de determinação entre métricas LiDAR e biomassa florestal acima do solo variaram entre 0,74 e 0,96 nos estudos de Lefsky et al. (2002), Naesset (2004), Nelson, Niemann e Wulder (2007), Silva et al. (2014) e Stephens et al. (2012).

Na Figura 10, estão plotados os valores observados via inventário e os respectivos valores preditos via modelo ajustado através do laser aerotransportado.

Figura 10 - Gráfico de dispersão com valores observados, e valores preditos com o modelo ajustado.

$$AGB = 288,6(Elev. CV) - 433,9(Elev. L3^2) + 21,96(Elev. MAD. mode)^3 + 17,30(Elev. P99)^4$$



Fonte: Autor.

Stephens et al. (2012) pesquisaram a relação entre o estoque de carbono estimado via inventário e métricas LiDAR, em florestas da Nova Zelândia. O modelo que melhor representou as estimativas da biomassa florestal conseguiu explicar 74% da variação total e utilizou as variáveis percentis 30 da altura (P30) e cobertura da copa. Os resultados convergem com os encontrados no presente estudo, pois a fonte de dados é semelhante. Ambos explicaram satisfatoriamente as condições florestais locais, 74% na Nova Zelândia e 76% na área de estudos.

De acordo com a natureza das estimativas, podem-se aceitar equações capazes de fornecer estimativas mais precisas ou menos precisas. Resende et al. (2002) ajustaram equações de regressão para estimar o volume, a biomassa e o estoque de carbono no Cerrado e consideraram, mesmo apresentando erros entorno de 30%, que as equações selecionadas foram satisfatórias, devido a variabilidade natural existente na estrutura da vegetação

Resultados semelhantes aos encontrados, pois registraram erro na casa de 30%, ou seja, considerando que o estudo foi realizado com floresta tropical, o resultado de 24% de erro foi considerado muito bom devido à grande variabilidade das florestas tropicais, ainda é importante salientar que as condições climáticas, no caso do laser aerotransportado e a

dificuldade de acesso para a realização do inventário, são fatores importantes a se considerar quando são relativos ao aumento do erro.

Silva et al. (2014), estimando o estoque de biomassa acima do solo presente em um plantio de eucalipto, desenvolveram o modelo de estimativa a partir do percentil 95, do coeficiente de variação e do desvio padrão da altura, do percentil 80 da intensidade e da cobertura do dossel. Já Naesset (2002) utilizou as variáveis altura e densidade da copa para modelagem por meio da técnica de regressão linear múltipla. Os resultados mostraram que é possível prever o comportamento da biomassa em até 90% com o emprego de regressores LiDAR.

No presente estudo a variável melhor correlacionada e, porém, utilizada, foi percentil a P99 ou altura a 99%, a modelagem foi considerada satisfatória, pois explicou 76% da variação com $Sy_x\%$ 26,95, mas quanto ao percentil próximo de 95%, coeficiente de variação e cobertura de dossel, são todas variáveis de elevação e não de intensidade.

Também é importante ressaltar que, a partir dos dados LiDAR, foi encontrado, para a área de estudo, uma altura média da área de 29,76 m e na variável medida a campo pelo inventário a altura média foi de 32,5 m na área, a diferença pode ser explicada pela dificuldade de visualizar o final da copa das árvores principalmente as de grande porte no interior da floresta mais adensada, com indivíduos de alturas próximas a 30 m de altura.

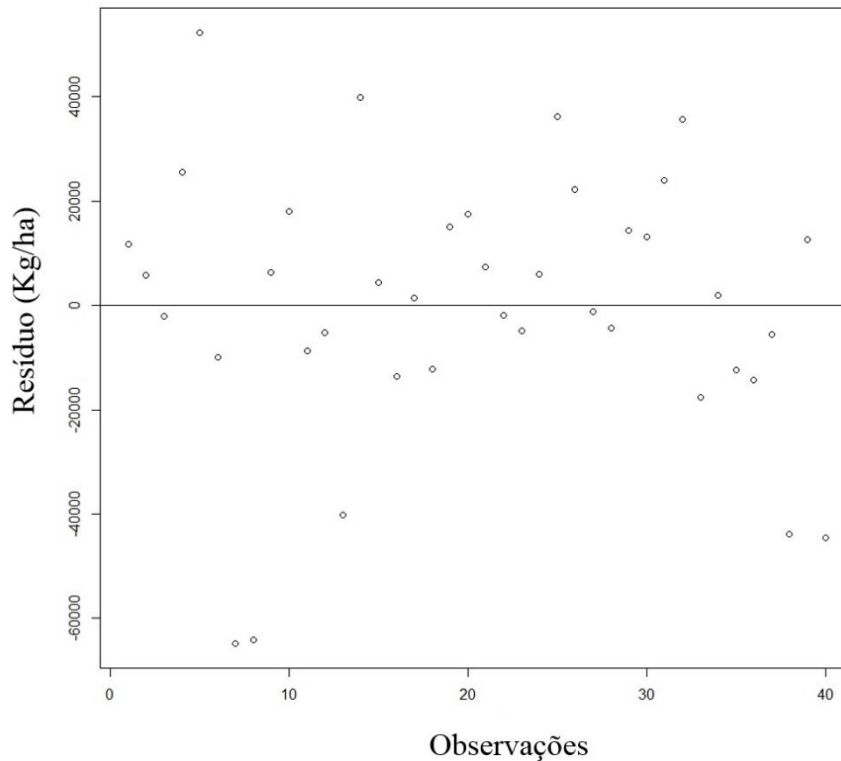
Observa-se uma constante nos estudos que estimam biomassa, a partir das métricas LiDAR, no que diz respeito aos percentis altura e cobertura do dossel. Naesset e Gobakken (2008), estimando a biomassa florestal acima do solo a partir das métricas LiDAR, utilizaram percentil 90 da altura e densidade do dossel como variáveis independentes da regressão. Segundo os autores, a variável altura do dossel era mais explicativa para biomassa aérea florestal do que a densidade do dossel.

Observa-se que o resíduo do modelo utilizado para estimativa da biomassa apresenta uma grande amplitude nos dados e maior erro quando comparado a outros estudos, este fato pode ser justificado pela heterogeneidade da floresta amazônica em relação à diversidade de espécies, tendo em vista que diferentes tipologias florestais possuem diferentes distribuições de biomassa, inferindo-se cautela com o uso comparado de equações que estimaram biomassa em condições divergentes com o do presente trabalho.

Quando analisado os resíduos, quanto ao pressuposto de normalidade foi plotado e avaliado também graficamente na Figura 11, onde fica verificado que os resíduos não possuem nenhuma correlação. Quanto à avaliação pelo teste de Shapiro-Wilk foi verificada a normalidade, como os valores de significância foram superiores a 0,05, os dados apresentaram

distribuição normal. Os resíduos do modelo foram avaliados também quanto a homocedasticidade da variância pelo teste de White e independência dos resíduos pela estatística de Durbin-Watson.

Figura 11- Gráfico de dispersão dos resíduos



Fonte: Autor

Na validação, optou-se por verificar se os demais modelos seriam aprovados, pois os critérios estatísticos apontaram pouca diferença para o modelo final proposto. A Tabela 8 demonstra os resultados dos testes utilizados para a validação dos modelos de predição da biomassa. Os coeficientes que compõem os modelos ajustados, para a estimativa de biomassa foram testados para todos os modelos com significância de 95% de probabilidade, apontando diferença apenas pelo teste “t”, de *Student*.

Tabela 8 – Validação dos modelos de predição da biomassa pelo teste t de *Student*

Modelo	Correlação	t	t p valor	Resultado t
Modelo 1	0,84878	9,53150	1,859212	VO e VE Dif
Modelo 2	0,30404	-6,72656	2,635278	VO e VE Dif
Modelo 3	0,32426	-5,16498	6,505239	VO e VE Dif
Modelo 4	0,23767	-6,70715	2,737069	VO e VE Dif
Modelo 5	-0,73422	-6,90265	1,872932	VO e VE Dif
Modelo 6	0,91311	1,92344	0,070387	VO e VE Não Diferem

Fonte: Autor.

Em que:

VO = Valor Observado;

VE = Valor Estimado.

Observando-se o resultado do teste t na análise de validação, somente o modelo 6, polinômio de grau 4, descreve a variabilidade dos dados de campo na Fazenda Nova Neonita, ou seja, os valores observados a campo não diferem dos preditos. Portanto, é possível calcular a biomassa via equação para áreas de características semelhantes, importante ressaltar que o uso da equação é restrito a essas condições e os coeficientes devem ser recalculados para seu uso em condições distintas para reassegurar maior nível de precisão.

Com os dados foi observado um valor médio de biomassa florestal calculado via inventário de 398,5 t/ha na área da Fazenda Nova Neonita, esse valor representou uma superestimativa (percentual de 5,6 %) para os dados estimados via laser, que foram em média de 376,1 t/ha. Assim, quando comparados, notou-se uma diferença de biomassa florestal de 22,4 t/ha.

Os valores são próximos a outros encontrados em literatura, em que a biomassa florestal utilizando LiDAR é menor do que a média de biomassa estimada para áreas de floresta da Amazônia, como por exemplo: Baccini et al. (2012) 290,5 t/ha, de Nogueira et al. (2008) 305,3 t/ha e de Saatchi et al. (2011) 318,4 t/ha. Ressalta-se, no entanto, que os valores de biomassa florestal obtidos através dos dados LiDAR foram consistentes com os dados de campo.

Os resultados permitiram detectar as mudanças de altura e biomassa florestal, o que foi também comprovado com os dados de campo. A diferença dos resultados encontrados entre os dados de campo e os dados de LiDAR, podem estar relacionados com o baixo número

amostral dos dados de campo. A partir dos dados coletados pelo LiDAR foi possível avaliar a área em toda a sua extensão, o que permitiu analisar a variação na sua estrutura. Assim, os resultados obtidos com os dados de LiDAR se mostraram consistentes quando comparados aos dados de campo que serviram como base para desenvolvimento desse trabalho.

A estimativa de biomassa por meio de dados LiDAR englobam variáveis ajustadas de acordo com as condições da área de estudo. Assim, outros fragmentos ou tipologias florestais, devido às características inerentes de cada área, como solo, espécies e condições climáticas, as quais têm influência direta no desenvolvimento vegetal, podem alterar essa dinâmica, havendo a necessidade de um ajuste de um novo modelo que incluem essas características.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados do inventário quando relacionados a métricas LiDAR mostraram-se eficientes na caracterização da floresta sendo que é possível obter estimativas acuradas da biomassa acima do solo.

A partir desse estudo é possível observar que os dados Lidar fornecem informações importantes sobre a cobertura florestal com a redução de custos e tempo de campo. A equação contendo as variáveis Elev.CV, Elev.L3, Elev.MAD.mode e Elev.p99 engloba 76% da variabilidade dos dados de campo na estimativa de biomassa de uma floresta tropical da Amazônia, para a área de estudo no município de Paragominas, Pará, Brasil.

Este trabalho mostra que há um grande potencial para utilizar dados de laser para monitoramento e quantificação de florestas em geral. As métricas LiDAR modeladas a partir da regressão linear múltipla, para dados de floresta tropical nativa, foram satisfatórias para predição de biomassa acima do solo.

Acredita-se, também, que há grandes desafios e um longo caminho para se trabalhar com bons dados de sensoriamento remoto, desafios principalmente de engenharia de software e computacionais para melhorar as aplicações para os diversos fins. No caso dos dados de laser, ainda é um problema trabalhar com grandes áreas, devido ao alto nível de detalhamento, o que exige acarreta em demora de processamento dos dados.

Numa aplicação futura, torna-se importante a estimativa de biomassa e carbono destas florestas por meio de classificadores não paramétricos ou a utilização de *machine learning* para melhorar informações coletadas nos dados de laser e relacioná-las ao inventário florestal, qualquer acréscimo nas estimativas na Amazônia, considerando sua complexidade e a ampla extensão são bem-vindas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEY, R. et al. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o **Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental** sobre Mudanças do Clima: Sumário para os Formuladores de Políticas. 2007.

ALMEIDA, L. S. de; COUTINHO, C. H. O.; SANTANA, A. C. Perspectiva para o reflorestamento no Estado do Pará a partir do uso da terra no nordeste e sudeste paraense. **Amazônia: Companhia & Desenvolvimento**. Belém, v. 7, n. 13, Jul/Dez., 2011. Disponível em:

<http://siteantigo.bancoamazonia.com.br/bancoamazonia2/Revista/edicao_13/n13_perspectivas_para_o_re.pdf>. Acesso em: 25 Nov 2017.

ALMEIDA, O.T.; UHL, C. Planejamento do uso do solo do município de Paragominas utilizando dados econômicos e ecológicos. Belém: **Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia**, 1998. 46 p. (Série Amazônia, 9).

AMARO, A.; TOMÉ, M. Empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation. Preface, p 5-7. **Edições Salamandra**, Oeiras, Portugal, 1997.

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.

AVITABILE, V. et al. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. **Global Change Biology**, v. 22, n. 4, p. 1406–1420, 2016.

BABCOCK, C.; FINLEY, A. O.; COOK, B. D.; WEISKITTEL, A.; WOODALL, C. W. Modeling forest biomass and growth: Coupling long-term inventory and lidar data. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 1 – 12, 2016.

BACCINI, A.; GOETZ, S. J.; HOUGHTON, R. A. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, Nature Publishing Group, v. 2, n. 3, p. 182–185

BAGGIO, A. J. et al. Relatório sobre experiências na implantação de unidades de referência tecnológica em sistemas agroflorestais, no Projeto Iguatú II. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2009. 42 p. (Embrapa Florestas, Documentos, 181).

BANCO MUNDIAL, 2017 Disponível em: <http://www.worldbank.org/pt/news/press-release/2017/12/14/brazil-amazon-new-project-implement-sustainable-landscapes>. Acesso 20 fev. 2017.

BASTOS, T. X.; ROCHA, A. M. A da; PACHECO, N. A.; SAMPAIO, S. M. N. Efeito da remoção da floresta ombrófila sobre regime pluviométrico no município de Paragominas - PA. **Boletim de Geografia Teórica**, Brasil, v. 23, n. 45-46, p. 85-92, 1993.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Levantamento de recursos minerais**. Folha SA.23 – São Luís e parte da folha SA.24 – Fortaleza. Geologia,

geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia. 1973. v.3.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Portaria MMA n. 28**, de 24 de janeiro de 2008. Dispõe sobre os municípios situados no Bioma Amazônia onde incidirão ações prioritárias de prevenção, monitoramento e controle do desmatamento ilegal. Acesso em: 30 Nov 2017.

BRITTEZ, R. M. et al. Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na Floresta Atlântica do Sul do Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2006. 165p.

CARVALHO, G.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D.; MATTOS, L.; SANTILLI, M. An Amazon perspective on the forest-climate connection: opportunity for climate mitigation, conservation and development? **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, v. 6, n. 1-2, p. 163-174, Mar. 2004.

CHAVE, J., Eamus, D., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., Yamakura, T. **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests**. *Oecologia*, 145, 87–99. 2005.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.

CONSTANZA, R. et al. 1997. "the value of the world's ecosystem services and natural capital". **Nature**, vol 387, nº6230, p.253-260

COOPER, C. F. Carbon storage in managed forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 13, n. 1, p. 155-165, 1983.

COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. Business Research Methods. McGraw-Hill Higher Education, London. **Journal of Geographic Information System**, Vol.7 No.4, 2015.

CORTE, A. et al. **Os projetos de redução de emissões do desmatamento e da degradação florestal (REDD)**. Floresta, América do Norte, Curitiba, n. 42, mar. 2012.

DIXON, R. K. et al. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. **Science**, v. 263, p. 185-190, 1994.

DRAKE, J. B. et al. Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships. **Global Ecology & Biogeography**, Oxford, v. 12, n. 12, p. 147-159, 2003.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. Applied regression analysis. New York: J. Wiley e Sons, 1981. 2 ed. 709p.

DUBAYAH, R. O.; et al. Land surface characterization using lidar, **Remote Sensing**. Spatial Information for Land Use Management. International Publishers Direct, Singapore. 2000.

ELACHI, C. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. New York: Wiley, 1987.

EMBRAPA, 2014 Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/3862/paisagens-sustentaveis>. Acesso 23 jan 2018.

FENG, Y. et al. Examining effective use of data sources and modeling algorithms for improving biomass estimation in a moist tropical forest of the Brazilian Amazon. **International Journal of Digital Earth**, v. 10, n. 10, p. 996–1016, 2017.

FERREIRA, ALMEIDA, AMARAL & PAROLIN., Riqueza e composição de espécies da floresta de Igapó e várzea da Estação Científica Ferreira Penna: Subsídios para o plano de manejo da floresta nacional de Caxiuanã.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM, 269 p, 1992.

FINGER, C.A.G. Ein Beitrag zur Ertragskunde von Eucalyptus grandis und salignain Südbrasilien. **Dissertation Universität für Bodenkultur**, Wien, 1992. 135 p

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Texto, 2002. 97 p.

FOODY, G. M. et al. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, v.85, n.4, p. 463-474, 2003.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A.; TOLEDO, G. L. **Estatística aplicada**. São Paulo, Ed. Atlas, p.11-140, 2008.

FREITAS, S. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Diagnosticando florestas tropicais através do sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 1671-1678.

FREITAS, E. "Composição da Floresta Amazônica"; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/a-composicao-floresta-amazonica.htm>>. Acesso em 22 de abril de 2018.

GERWING, J.J. Degradation of forests through logging and fire in the eastern Brazilian Amazon. **Forest ecology and management**, v.157, n.1, p.131-141, 2002.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n.63, p.231-244, 2010.

GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.

GOOGLE - Inc. Google Earth. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 28 jan 2017.

GORGENS, E. B.; SILVA, A. G. P. da; RODRIGUEZ, L. C. E. **LiDAR: aplicações florestais**. 1ª ed., Curitiba-PR: CRV, 2014. 132p

HAIR, J. F. Jr. et al. **Multivariate Data Analysis**. 6 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.

HIGUCHI, N. et al. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 28, p. 153-165, 1998.

HOLDWORTH, A. R.; C. UHL, C. Fire in Amazonian selectively logged rain forest and the potential for fire reduction. *Ecological Applications* **7**:713-725. 1997.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: **Emissão x sequestro de CO₂**: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. Rio de Janeiro: UFRJ, p. 38-76, 1994.

HUDAK, A. et al. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 5, p. 2232-2245, May 2008.

HUNTER, M. O. et al. Structural dynamics of tropical moist forest gaps. **PLoS ONE**, v. 10, n. 7, p. 1–19, 2015.

INPE. 2004b. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/produtos/queimadas/proarco> Acesso em: 21 de jan. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo **demográfico 2013**. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=150550&search=||infoagr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>>. Acesso em: 24 Fev. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001: synthesis report. Summary for policymakers**. 2001. 34 p. Disponível em:<<http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-spm/synthesis-spm-en.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Sinopse preliminar do censo demográfico 1991. Rio de Janeiro: IBGE. 74p. 1991.

INSTITUTO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL DO PARÁ - IDESP. Convênios. Diagnóstico do município de Paragominas. Belém, IDESP. Coordenadoria de Documentação e Informação (Relatórios de Pesquisa, 3). 236p. 1977.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª Ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 672 p, 2009.

KOCH, B. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. **ISPRS J Photogram Remote Sensing** **65**:581–590, 2010.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 53, n. 4, p. 193-203, Aug. 1998.

LEAL, G. L. R. **Paragominas: A realidade do pioneirismo**. Belém: Alves, 2000.

LEFSKY, M. A. et al. LiDAR remote sensing of aboveground biomass in three biomes. **Global Ecology and Biogeography**, Oxford, v. 11, n. 5, p. 393-399, 2002.

LEITOLD, V. **Airborne LiDAR-based estimates of tropical forest structure and ground topography in a mountainous area of the Brazilian Atlantic Forest**. 122 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2014.

LEVINE, D. M. et al. **Statística - teoria e aplicações usando o microsoft Excel em português**, Rio de Janeiro: LTC, 3 ed. 2005.

LUCCI, (2010) web - our window to the world. In: LUCCI Annual Report 2009/2010, A. Lindroth et al. eds. ISBN: 978-91-85793-13-6. Lund University, 2010.

MACHADO, P.L.O.A.; et al. Os solos brasileiros e o sequestro de carbono. **Boletim Informativo – Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, 29:21-25, 2004.

MACGAUGHEY, R. J. **FUSION/LDV: software for LiDAR data analysis and visualization**. Fusion Version 3.42. Washington: USDA, 2004. 175 p.

MAESTRI, R. Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais. **Tese de Doutorado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná**. 2003.

MAESTRI, R. et al. Um sistema de predição do crescimento e da produção para povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* de Wild). **Revista Árvore**, v. 19, n. 3, pp. 358-381. 1995.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Ceres, 1980, 251p.

MARENCO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da região amazônica. In: CAVALCANTI, I. F. A. (Org.). **Tempo e Clima do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, p.198-212, 2009.

MARTINELLI, L. A. et al. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais. Seminário Emissão X Sequestro de CO₂ – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, Rio De Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: CURD, 1994.

MASCARO, J. et al. Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3770 – 3774, 2011.

MATRICARDI, E. A. T.; et al. Multi-temporal detection of selective logging in the Amazon using remote sensing. **Special Report BSRSI Research Advances** – Tropical Forest Information Center, Michigan State University N°. RA03-01/w, 2001, 27p.

MELLO, S.L.M.; GONÇALVES, J.L.M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.

MENESES, P. R. Princípios de Sensoriamento Remoto. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, 2012. 266 p. cap. 1

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Pagamentos por Serviços ambientais**, Perspectivas para a Amazônia Legal. Disponível em <http://www.mma.gov.br/estruturas/168/_publicacao/168_publicacao17062009123349.pdf>. Acesso em 15 set de 2017.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ª ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p

MÜLLER, M. D. et al. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistemas agrossilvipastoril na Zona da Mata. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 60, p. 11-17, dez. 2009. Edição especial

Mudança do clima 2007: impactos, adaptação e vulnerabilidade. 2007b. 30 p. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html>. Acesso em: 8 dez 2017.

Mudança do clima 2007: mitigação da mudança do clima. 2007c. 42 p. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html>. Acesso em: 8 dez 2017.

MYNENI, R. B.; et al. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *PNAS*, v.98, n.26, p. 14784- 14789, 2001.

NAESSET, E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, n. 1, p. 88-99, 2002.

NAESSET, E. Estimation of above and below-ground biomass in boreal Forest ecosystems. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science**, Freiburg, v. 36, n. 8, p. 145-148, Oct. 2004.

NAESSET, E.; GOBAKKEN, T. Estimation of above and belowground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 6, p. 3079-3090, 2008.

NELSON, B. W. Natural forest disturbance and change in the brazilian amazon. **Remote Sensing Reviews**, v. 10, n. 1-3, p. 105–125, 1994.

NELSON, B. W.; BIANCHINI, M. C. Complete life cycle of southwest amazon bamboos (*guadua* spp) detected with orbital optical sensors. **Anais**. INPE, 2005.

NEPSTAD, D.; et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature** 398(6727): p. 951-953, 1999.

NOGUEIRA, E. M.; et al. Estimates of forest biomass in the brazilian amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 11, p. 1853 – 1867

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do LiDAR no inventário de florestas plantadas**. 2011. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

ORUÉ, N. E. **Estimativa de volume de povoamentos de Pinus spp. Utilizando dados do satélite Landsat 7**. 2002. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

PALACE, M. W.; SULLIVAN, F. B.; SILVA, J. M. E. Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return lidar data. **Remote Sensing of Environment**, v. 161, p. 1–11, 2015.

PARÁ (Estado). Secretaria de Estado de Planejamento, Orçamento e Finanças. **Estatísticas Municipais. Mesorregião Sudeste Paraense. Paragominas**. 2008. Disponível em: <http://www.sepof.pa.gov.br/estatistica/ESTATISTICAS_MUNICIPAIS/Mesorr_Sudeste/Paragominas/Paragominas.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2017.

PINTO, A. et al. **Diagnóstico socioeconômico e florestal do município de Paragominas**. Belém: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2009. 65 p. Relatório Técnico. Disponível em <<http://www.imazon.org.br/novo2008/arquivosdb/Diagnostico-PGM.pdf>>. Acesso em: 10 nov 2017.

POEH, C. et al. The user of LiDAR technology for sustainable Forest management in Glen Affric. **European Association of Remote Sensing Laboratories**, Paris, v. 30, n. 1, p. 365-370, 2010.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. 2. ed. São José Dos Campos: Saraiva, 2012. 160p
 PUIG, C.J. **Carbon sequestration potential of land-cover types in the agricultural landscape of eastern Amazonia, Brazil**. Bonn: Universidade de Bonn, 2005. 75 p. (Ecology and Development Series, 33).

POPESCU, S.C. Estimating plot-level forest biophysical parameters using small-footprint airborne LiDAR measurements. 2002. 115p. Tese (Doutorado em Floresta) - Virginia Tech. Department of Forestry, Blacksburg, 2002.

POPESCU, S. C. et al. Satellite Lidar vs. small footprint airborne Lidar: Comparing the accuracy of aboveground biomass estimates and forest structure metrics at footprint level. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 11, p. 2786-2797, 2011.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017. Acesso 3 jan 2018.

REZENDE, A.V. O estoque de carbono no cerrado: um estudo de caso. As florestas e o carbono. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002. p.175-190.

RIBEIRO, S. C. **Estoque de biomassa e carbono em cerrado e em plantio comercial de eucalipto no Estado de Minas Gerais**. 2011. 71 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO, H.F. **Matas ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2000. cap. 15.1, p. 235-247.

SAATCHI, S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 24, p. 9899–9904, 2011.

SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M.A.B. & GOMES, F.S. As florestas e o carbono. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002.

SATO, L. Y. et al. Post-fire changes in forest biomass retrieved by airborne LiDAR in Amazonia. **Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 1–15, 2016.

SAWADA, Y.; SUWA, R.; JINDO, K.; ISHIZUKA, M. A new 500 m resolution map of canopy height for amazon forest using space borne lidar and cloud-free {MODIS} imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 43, p. 92 – 101, 2011.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. de. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS, 2009. 294p.

SCHROEDER, P. Carbon storage potencial of short rotation tropical tree plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 50, p. 31-41, 1992.

SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M.; BARBIERI, S. Quantificação da biomassa e do conteúdo de nutrientes no corte raso de uma floresta de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze. na região de Quedas do Iguaçu-PR. Santa Maria, RS: UFSM, 2002.

SILVA, C. A. et al. Mapping aboveground carbon stocks using LiDAR data in Eucalyptus spp. plantations in the state of São Paulo, Brazil. **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 591-604, 2014.

SILVA, J. A. A; NOBRE. **O Código Florestal e a Ciência: Contribuições para o diálogo**. ISBN 978-85-86957-16-1, São Paulo: SBPC, 2011.

SIVAM. Disponível em: <<http://www.raytheon.com/produts/sivam>. Acesso em 21 de Fev 2017.

SNIF, 2014 Sistema Nacional de Serviços Florestais, 2017. Acesso em 11 fev 2018.

SOARES FILHO, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998. Disponível em: <<http://csr.ufmg.br/csr/publicacoes/tese/tese.html>>. Acesso em: 10 jan. 2018

SOUSA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de Pinus spp. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9.1998, Santos. **Anais**. Santos: INPE, 1998. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.11.10.35/doc/2_03p.pdf>. Acesso em: 17 dez 2017.

STEPHENS, P. R. et al. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 117, p. 348-357, 2012.

SUBRAMANIAN, A.; COUTINHO, A. S.; da SILVA, L. B. **Aplicação de método e técnica multivariados para previsão de variáveis termo ambientais e perceptivas**. Produção, v. 17, n. 1, p. 052-070, 2007.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de recursos naturais e estudos ambientais, 1991.

VERÍSSIMO, A., P. Barreto, R. Tarifa, and C. Uhl. 1995. Extraction of a high-value natural source from Amazon: the case of mahogany. *Forest Ecology and Management*, p39-60.

VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; MATTOS, M.; TARIFA, R.; UHL, C. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: the case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, v.55, p.169-199, 1992.

VERSTRAETE, M. M., B. PINTY, MYNENI, R. B. Potential and Limitations of Information Extracting on the Terrestrial Biosphere from Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment* 58(2):201-214, 1996.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; TRÜBY, P. Quantificação da biomassa em uma Floresta Estacional Decidual em Itaara, R.S., Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 419-425. 2006.

WATRIN, O. S.; ROCHA, A. M. A. **Levantamento de vegetação natural e uso da terra no Município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/Landsat**. Belém: EMBRAPA-CPATU (EMBRAPA-CPATU. Boletim de Pesquisa, 124), 1992.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com Araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência**

Florestal, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, abr./jun., 2009. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/cienciaflorestal/artigos/v19n2/A6V19N2.pdf>>. Acesso em 09 ago. 2017.

WATZLAWICK, L. F. Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite IKONOS II. 120 f. **Tese (Doutorado em Ciências Florestais)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

ZANDONÁ, D. F. et al, **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. p. 82, 2006.

ZANDONÁ, D. F. et al, Varredura a Laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas Airborne Laser Scanner technology for estimating dendrometric variables. **Scientia Forestalis, Piracicaba**, v. 36, n. 80, p. 295–306, 2008.

ZOLKOS, S.; GOETZ, S.; DUBAYAH, R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 289 – 298, 2013.

ANEXOS

ANEXO I – Detalhes técnicos das métricas LiDAR,