

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

EZAQUE SARAIVA DO NASCIMENTO

MODELAGEM DE BIOMASSA FLORESTAL E CÁLCULO DE CARBONO A PARTIR
DO INSTRUMENTO GEDI: UM ESTUDO A PARTIR DA RESERVA EXTRATIVISTA
CHICO MENDES ACRE BRASIL.

RIO BRANCO - ACRE, BRASIL
2023

EZAQUE SARAIVA DO NASCIMENTO

**MODELAGEM DE BIOMASSA FLORESTAL E CÁLCULO DE CARBONO A PARTIR
DO INSTRUMENTO GEDI: UM ESTUDO A PARTIR DA RESERVA EXTRATIVISTA
CHICO MENDES ACRE BRASIL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
Mestrado em Geografia – PPGMGEU/UFAC – Área de
Concentração: Produção do espaço e ambiente nas
fronteiras da Amazônia Sul Ocidental. Linha de pesquisa:
Análise da Dinâmica Socioambiental. Requisito para obtenção
do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof (a) Ph.D. Karla da Silva Rocha

RIO BRANCO – ACRE, BRASIL
2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

N244m Nascimento, Ezaque Saraiva do, 1981 -
Modelagem de biomassa florestal e cálculo de carbono a partir do
instrumento GEDI: um estudo a partir da reserva extrativista Chico Mendes Acre
Brasil /Ezaque Saraiva do Nascimento; Orientadora: Drª. Karla da Silva Rocha. -
2023.
81 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-
Graduação em Geografia, Mestre em Geografia, Rio Branco, 2023.
Inclui referências bibliográficas.

1. GEDI. 2. Sensoriamento remoto. 3. Floresta. I. Rocha, Karla da Silva
(orientador). II. Título.

CDD: 910

Bibliotecária: Nádia Batista Vieira CRB-11º/882.

EZAQUE SARAIVA DO NASCIMENTO

**MODELAGEM DE BIOMASSA FLORESTAL E CÁLCULO DE CARBONO A PARTIR
DO ISNTRUMENTO GEDI: UM ESTUDO A PARTIR DA RESERVA EXTRATIVISTA
CHICO MENDES ACRE BRASIL.**

Dissertação APROVADA como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em
Geografia, da Universidade Federal do Acre, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora: Prof^a. PhD. Karla da Silva Rocha
PGEO/UFAC

Prof^o. Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano
Membro Internos PPGEO/UFAC

Prof^o Dr. Caio Hamamura
Membro Externo EPT/IFSP

Dedicatória

A minha família Edina, Clara e Cauã pela paciência, apoio e compreensão durante minha trajetória de vivência na pós-graduação.

Dedico também este trabalho a meus pais Sandoval Nogueira do Nascimento e Tereza Saraiva do Nascimento por todo incentivo à educação que me foi concedido.

Agradecimento

A Deus, por me permitir chegar até aqui.

Em especial a minha família Edina Clara e Cauã pelo apoio incondicional durante meus estudos, pela compreensão nas muitas horas de estudo dedicadas a esta pesquisa. Sem esse apoio não seria possível a realização deste sonho, a vocês a minha gratidão por me ajudarem nessa nova meta traçada e agora alcançada.

A minha orientadora Professora Drª. Karla da Silva Rocha, pela orientação sempre cuidadosa e pertinente, pelo incentivo, pela motivação nos momentos de desânimo e por acreditar no meu potencial para o alcance dos objetivos levantados pelo presente trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Geografia-PPGEO da UFAC pelos ensinamentos e incentivos que mesmo de forma remota prestaram seu papel de forma assídua e exemplar. A Coordenação do PPGEO por todo o apoio prestado. A coordenação da CAPES pelo período em que fui bolsista do referido programa. A Instituição de ensino, Universidade Federal do Acre que me proporcionou realizar o Mestrado em Geografia. Agradeço ainda ao Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Acre - LAGEOP/UFAC pela disponibilidade de dados orbitais, infraestrutura para processamento e realização desta pesquisa.

Aos meus colegas da turma 2020 do mestrado em Geografia (UFAC), que juntos experimentamos o desafio de compartilhar conhecimentos das disciplinas de forma remota por todo o período das disciplinas por motivo da pandemia e que com esforço e determinação superamos esta etapa. Apesar de não ter conhecido a todos pessoalmente devido a tais circunstâncias, deixo o meu agradecimento pela e troca de experiências e colaboração nas atividades desenvolvidas de forma remota, reitero ainda o desejo de conhecê-los pessoalmente quem sabe numa ocasião oportuna.

RESUMO

Durante as últimas décadas as florestas tropicais têm sido constantemente ameaçadas pelas crescentes taxas de desmatamento. Esse desmatamento é caracterizado geralmente pela retirada da floresta para implantação de outras culturas como a de produção de alimentos ou para cultivo de pastagens. As florestas tropicais são responsáveis por manter uma diversidade surpreendente de espécies, sendo estas vitais para que nosso planeta se mantenha habitável, ajudando no controle de erosões, na redução de inundações e ainda no controle do ciclo hidrológico e na regulação do clima. Com o desmatamento e posterior queima da vegetação ocorre também a liberação do CO₂ para atmosfera, esse fenômeno tem levantado discussões relevantes pela comunidade científica no que se refere a alternativas para a mitigação dessas emissões. Conhecer de forma mais precisa os quantitativos de biomassa e carbono acima do solo podem colaborar em pesquisas relacionadas ao assunto em tela. Nesse sentido, a presente pesquisa propôs testar uma nova metodologia para mensuração de biomassa e carbono florestal a partir de dados disponibilizados do sistema GEDI, informações 3D da floresta mensurados por sistemas laser diretamente do espaço. A presente pesquisa contou com o uso dos dados GEDI, associado a imagens multiespectrais, cálculos geoestatísticos, técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para a obtenção de valores de biomassa e carbono florestal acima do solo numa área de 1.857,68 hectares na Unidade de Conservação Reserva Extrativista Chico Mendes no Acre. Os resultados apontaram aproximadamente 9.197.088,38 Mg de biomassa acima do solo e aproximadamente 2.648.761,44 MgC. A espacialização da biomassa e do Carbono resultou em 74 imagens ilustrando a distribuição dos valores da biomassa e do carbono florestal para cada Unidade amostrada. Os resultados demonstraram a possibilidade da utilização dos dados e da metodologia proposta para regiões florestais e com cobertura dos dados GEDI.

Palavras-chave: GEDI, Sensoriamento Remoto, Floresta, Mapeamento, Biomassa e Carbono.

ABSTRACT

During the last few decades tropical forests have been constantly threatened by increasing rates of deforestation. This deforestation is generally characterized by the removal of the forest for the implantation of other crops such as food production or for the cultivation of pastures. Tropical forests are responsible for maintaining an amazing diversity of species, which are vital for our planet to remain habitable, helping to control erosion, reduce flooding and control the hydrological cycle, helping to regulate the climate. With deforestation and subsequent burning of vegetation, CO₂ is also released into the atmosphere, this phenomenon has raised relevant discussions by the scientific community regarding alternatives for mitigating these emissions. Knowing more precisely the amounts of biomass and carbon above ground can collaborate in research related to the subject in question. In this sense, the present research proposed to test a new methodology for measuring biomass and forest carbon from data available from the GEDI system, 3D information of the forest measured by laser systems directly from space. The present research used GEDI data, associated with multispectral images, geostatistical calculations, remote sensing techniques and geoprocessing to obtain values of biomass and forest carbon above ground in an area of 1.857,68 hectares in the Reserve Conservation Unit Chico Mendes in Acre. The results indicated approximately 9.197.088,38 Mg of biomass above ground and approximately 2.648.761,44 MgC. The spatialization of biomass and carbon resulted in 74 images illustrating the distribution of biomass and forest carbon values for each unit sampled. The results demonstrated the possibility of using the data and the proposed methodology for forest regions and with GEDI data coverage.

Keywords: GEDI, Remote Sensing, Forest, Mapping, Biomass and Carbon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Esquema ilustrativo dos 3 Lasers disparando ondas sobre a superfície terrestre e área de abrangência na superfície	11
Figura 02 – Mapa de Localização da Reserva Extrativista Chico Mendes.....	16
Figura 03 – Mapa Pedológico da Reserva Extrativista Chico Mendes.....	19
Figura 04 – Mapa Hidrográfico da Reserva Extrativista Chico Mendes	20
Figura 05 – Mapa das Tipologias Florestais da Reserva Extrativista Chico Mendes.....	21
Figura 06 – Mapa de localização das áreas de estudo	25
Figura 07 - Esquema ilustrativo da área de cobertura espacial de cada ponto	39
Figura 08 - Sequência da rasterização utilizada para obtenção dos valores de biomassa em uma das Unidades de Trabalho	40
Figura 09 - Mapas de biomassa GEDI estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu Densa - FABD	43
Figura 10A - Mostra 12 mapas de biomassa estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu - FAB	45
Figura 10B - Mostra a continuação com mais 11 mapas de biomassa estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.....	46
Figura 11 - Mostra os 11 mapas de biomassa estimados dentro da região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa	48
Figura 12 - Gráfico com valores de biomassa/ha nas três tipologias analisadas	49
Figura 13 - Gráfico de correlação entre biomassa do GRID global e valor médio de biomassa estimada	51
Figura 14 - Mostra os mapas de distribuição de carbono estimados das três Unidades de Trabalho localizadas dentro da região de Floresta Aberta com Bambu Densa - FABD	52
Figura 15A - Mostra os 15 mapas de distribuição do carbono estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu - FAB	54
Figura 15B - Mostra a continuidade com mais 8 mapas de distribuição de carbono estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu - FAB	55
Figura 16 - Mostra 11 mapas de carbono estimados dentro da região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Biomassa total encontrada a partir de dados do inventário florestal	31
Tabela 02 - Biomassa total encontrada a partir de dados do inventário florestal por cada Seringal	33
Tabela 03 - Matriz de correlação para a região Floresta Aberta com Bambu Densa – FABD (Landsat 8)	34
Tabela 04 – Matriz de correlação para a região Floresta Aberta com Bambu – FAB e Bandas espectrais dos satélites Landsat 8.....	34
Tabela 05 - Matriz de correlação para a região Floresta Aberta com Palmeira Aluvial - FAPa e Bandas espectrais dos satélites Landsat 8.....	34
Tabela 09 - Estimativas de biomassa pelo método de interpolação para as três Unidade de Trabalho na região de FABD	43
Tabela 10 - Estimativas de biomassa GEDI para as vinte e três Unidades de Trabalho na região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.....	44
Tabela 11 - Estimativas de biomassa GEDI para as 11Unidades de Trabalho na região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa.....	47
Tabela 12 - Estimativas de carbono para as três Unidade de Trabalho na região de Floresta Aberta com Bambu Densa – FABD.....	52
Tabela 13 - Estimativas de carbono para as 23 Unidade de Trabalho na região de Floresta Aberta com Bambu – FAB	53
Tabela 14 - Estimativas de carbono para as 11 Unidade de Trabalho na região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial - FAPa	56

LISTA DE SIGLAS

AMOPREAB	Associação de Moradores e Produtores da Reserva Extrativista em Assis Brasil
AMOPREX	Associação de Moradores e Produtores da Reserva Extrativista em Xapuri
CAP	Circunferência a Altura do Peito
CO ₂	Dióxido de Carbono
DAP	Diâmetro a Altura do Peito
DETER	Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IDW	Ponderação pelo Inverso da Distância
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	Índice de Vegetação
LIDAR	Light Detection and Ranging
Mg	Megagrama
MgC	Megagrama de Carbono
MTL	Arquivo de Texto
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
OLI	Operacional Land Imager
PM	Plano de Manejo
PMFMC	Plano de Manejo Florestal Comunitário
PMRCM	Plano de Manejo da Reserva Chico Mendes
PRODES	Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
RADAM	Projeto Radar da Amazônia
RESEX	Reserva Extrativista
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SR	Sensoriamento Remoto
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey
UT	Unidade de Trabalho
UAV	Veículo Aéreo Não Tripulado
UTM	Universal Transverse Mercator
ZEE	Zoneamento ecológico Econômico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
3 OBJETIVOS	3
3.1 Objetivo geral.....	3
CAPÍTULO 1	4
1.0 FUNDAMENTAÇÃO DA BASE TEÓRICA E CONCEITUAL.....	4
1.1 Monitoramento Florestal por Sensoriamento Remoto	4
1.2 Estimativa de biomassa e carbono florestal a partir de sensores orbitais	5
1.3 Light Detection and Ranging – LIDAR	7
1.4 UAV-LiDAR	9
1.5 Global Ecosystem Dynamics Investigation - GEDI	10
1.6 Biomassa Florestal	12
1.7 Carbono Florestal	13
1.8 Índices de Vegetação (IVs)	14
CAPÍTULO 2	16
2.0 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	16
2.1 Características físicas	17
2.1.1 Solos.....	17
2.1.2 Hidrografia.....	19
2.1.3 Tipologias Florestais.....	21
CAPÍTULO 3	23
3.0 ESTIMATIVAS DE BIOMASSA E CARBONO FLORESTAL ACIMA DO SOLO A PARTIR DE DADOS GEDI E IMAGENS MULTIESPECTRAIS LANDSAT 8	23
3.1 INTRODUÇÃO	23
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.2.1 Localização da área de estudo	24
3.2.2 Aquisição de dados	25
3.2.2.1 Imagem multiespectral	25
3.2.2.2 Dados de campo (inventário florestal).....	26
3.2.3 Estimativa da biomassa florestal a partir de imagens multiespectrais	27
3.2.3.1 Pré-processamento das imagens orbitais.....	27
3.2.3.2 Modificação Número Digital para Reflectância.....	27
3.2.3.3 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	28

3.2.3.4 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – SAVI.....	29
3.2.3.5 Biomassa Florestal acima do solo a partir do inventário florestal	29
3.2.3.6 Matriz de Correlação entre valores GEDI e refletância das Bandas e Índices de Vegetação.....	30
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
3.3.1 Cálculo da Biomassa a partir do inventário florestal	31
3.3.2 Correlação entre Biomassa GEDI e Refletância do Índice de Vegetação	33
3.4 CONCLUSÃO	36
CAPÍTULO 4.....	37
4.0 ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO FLORESTAL ACIMA DO SOLO A PARTIR DE DADOS GEDI POR INTERPOLAÇÃO	37
4.1 INTRODUÇÃO	37
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	38
4.2.1 Aquisição de dados GEDI	38
4.2.2 Análise de dados	40
4.2.2.1 Interpolação dos dados	40
4.2.2.2 Malha de pontos GEDI.....	40
4.2.2.3 Cálculo do carbono	41
4.3 RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	42
4.3.1 Biomassa GEDI pelo método de interpolação para diferentes substratos florestais	42
4.3.2 Região Floresta Aberta com Bambu Densa - FABD	42
4.3.3 Região Floresta Aberta com Bambu - FAB	44
4.3.4 Região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa	46
4.4 CÁLCULO DO CARBONO A PARTIR DOS DADOS GEDI.....	51
4.4.1 Taxas de Carbono para Região Floresta Aberta com Bambu Densa - FABD	51
4.4.2 Taxas de Carbono para Região Floresta Aberta com Bambu - FAB	52
4.4.3 Taxas de Carbono para Região Floresta Aberta com Palmeira Aluvial - FAPa	55
4.5 CONCLUSÃO	58
5.0 CONSIDERAÇÕES	59
6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

1 INTRODUÇÃO GERAL

Durante as últimas décadas as florestas tropicais têm sido constantemente ameaçadas pelas crescentes taxas de desmatamento. É estimado que cerca de 13 milhões de hectares de floresta tropical sejam desmatadas todo ano, esse valor é o mesmo que uma área equivalente a 50 campos de futebol LOURANCE (2008). Esse desmatamento caracterizado pela retirada da floresta para implantação de outras culturas, como plantações de alimentos ou de pastagens, tem sido uma das maiores causas do desmatamento das florestas tropicais em todo o mundo. No entanto, outros distúrbios florestais como a colheita seletiva de madeira também têm contribuído com o aumento na extensão das áreas desmatadas (ASNER *et al.* 2005).

Laurance (2008), aponta que as florestas tropicais são responsáveis por manter uma diversidade surpreendente de espécies, sendo estas vitais para que nosso planeta se mantenha habitável, pois, ajudam no controle de erosões, reduzem inundações e ainda controlam o ciclo hidrológico ajudando na regulação do clima. O autor destaca ainda que as áreas de florestas por meio da evapotranspiração emitem grande quantidade de água em forma de vapor para a atmosfera ajudando no processo de formação das nuvens que depois se precipitaram distribuindo a chuva na região e até mesmo para outras regiões.

Fonseca (2008) destaca que a maior parte do desmatamento mundial vem se dando no Brasil e na Indonésia, países com as maiores regiões de floresta do mundo. Estes países também têm se constituído, em países com grande demanda por carne, soja e madeira, atendendo aos grandes interesses corporativos, mas também aos interesses de pequenos proprietários. Diante desse cenário impulsionado fortemente pelas demandas capitalistas, e diante da iminente necessidade de preservação dos recursos florestais, algumas propostas acabam emergindo como é o caso da comercialização de carbono ou como é mais conhecido o sequestro de carbono que pode ser entendido como “forma de mitigação de menor custo para reverter o acúmulo de CO₂ na atmosfera na redução do efeito estufa” (YU, 2004).

Há um consenso mundialmente acerca do importante papel das florestas no processo das mudanças climáticas ao atuar como sumidouros, onde elas absorvem CO₂ da atmosfera e armazenam carbono em sua biomassa, constituindo amplos reservatórios desse elemento (SILVEIRA, 2008).

A região amazônica detém uma grande cobertura vegetal, por essa característica é também detentora de relevante importância no controle relacionado a mudanças climáticas

globais. Esta região dispõe da capacidade tanto de emitir gases do efeito estufa para atmosfera por meio do desmatamento e da queima, como também de absorção do carbono presente na atmosfera por meio do crescimento arbóreo (SOUZA, 2012). Porém, a partir da década de 1970, constata-se o aumento crescente da queima de combustíveis fósseis bem como as mudanças de uso da terra devido às queimadas realizadas convencionalmente na agricultura pelo corte de florestas, que têm provocado a liberação de grande quantidade de carbono na atmosfera. Esse fator tem acarretado o aumento contínuo da concentração de gás carbônico, o qual vem causando preocupação de ambientalistas, políticos, pesquisadores, bem como da população em geral (WATZLAWICK, 2003).

Este aumento contínuo da concentração de CO₂ na atmosfera, tem levantado discussões relevantes pela comunidade científica no que se refere a alternativas para a mitigação dessas emissões. O pagamento por serviços ambientais com o comércio de carbono, por exemplo, aparece como uma dessas possibilidades. Muitos cientistas têm defendido o comércio de carbono como uma forma de inibir o desmatamento nas florestas tropicais (LAURANCE 2008). No Brasil a normatização de serviços ambientais, é destacada pelo Código Florestal brasileiro vigente o qual foi instituído com a publicação da Lei n° 12.651, em 28-05-2012 (PRADO *et al.* 2015).

Nessa perspectiva de novos cenários econômicos sobre a utilização dos recursos florestais, principalmente referente ao mercado de carbono florestal, faz-se necessário a implementação de novos estudos que abordem novas tecnologias e metodologias para mensuração de biomassa e carbono florestal.

A utilização de novos dados, gerados por instrumentos com maior poder de captação de informação sobre as florestas, pode trazer novas possibilidades e melhorar o sistema de monitoramento florestal. Sendo assim, a obtenção de estimativas dos estoques de forma precisa permitirá uma maior compreensão do potencial das florestas no que se refere ao armazenamento de carbono florestal, além de melhorar as discussões com embasamento técnico-científico o que poderá contribuir na tomada de decisões mais assertivas quanto ao uso e preservação dos recursos florestais.

2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado a partir da introdução geral com os apontamentos preliminares sobre o assunto dissertado, seguido dos objetivos geral e específicos e dos quatro capítulos principais. O Capítulo I, destinou-se especificamente à fundamentação teórica e conceitual sobre os principais temas relacionados com a pesquisa. O capítulo II, foi destinado a apresentação das características principais sobre a área de estudo. O capítulo III, destinou-se a proposta de análise dos dados GEDI com uso de imagens multiespectral e o capítulo IV, discorreu sobre a análise dos dados GEDI com uso da técnica de interpolação para obtenção dos valores de biomassa e carbono florestal. E por fim, as considerações acerca das análises e resultados alcançados com o desenvolvimento da pesquisa.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização de dados do instrumento orbital GEDI para a quantificação de biomassa acima do solo e do carbono florestal em Unidade de Conservação na floresta tropical amazônica.

3.2 Objetivos específicos

1. Estimar o quantitativo de biomassa florestal em aproximadamente 1.857,68 ha de florestas a partir dados laser GEDI associado a imagens multiespectrais Landsat 8, sensor OLI;
2. Estimar o quantitativo de biomassa florestal a partir dados laser GEDI pelo método de interpolação;
3. Estimar percentual de carbono florestal disponível na área de estudo;
4. Utilizar técnicas de geoprocessamento para especializar os elementos (biomassa, carbono) presente na área de estudo.

CAPÍTULO 1

1.0 FUNDAMENTAÇÃO DA BASE TEÓRICA E CONCEITUAL

1.1 Monitoramento Florestal por Sensoriamento Remoto

Com o alto custo dos métodos convencionais e com o aprimoramento das tecnologias, novas possibilidades no campo da pesquisa sobre quantificação de biomassa e carbono acabam surgindo, como é o caso do monitoramento por sensores orbitais. Hentz (2014) afirma que a utilização de tecnologias advindas do sensoriamento remoto já tem demonstrado sua efetividade em análises da cobertura vegetal, permitindo acompanhar as frequentes mudanças no crescimento, acúmulo de biomassa e carbono ocorrentes na dinâmica de um ecossistema florestal natural.

O SR é uma ferramenta bastante utilizada em estudos e pesquisas no campo ambiental. O controle e monitoramento de grandes extensões territoriais principalmente em áreas destinadas à conservação ambiental tem sido uma realidade, e o SR associado a outras tecnologias tem permitido muitos avanços nas ações e atividades de controle e monitoramento em terras protegidas.

Com a popularização das imagens de satélite no Brasil, inicia-se uma nova fase em termos de monitoramento sobre o desmatamento no país. O monitoramento por imagem permitiu o acompanhamento da evolução de desmatamento anualmente, sendo possível a montagem dos resultados acumulados ao longo dos anos. Esses dados obtidos podem subsidiar o governo quanto aos direcionamentos em políticas públicas para o setor.

Para Júnior *et al.* (2007), entre 1996 e 1997 teve início o projeto de monitoramento do desmatamento da Amazônia Legal realizado pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR-IBAMA), cuja finalidade foi monitorar as alterações na cobertura vegetal nativa da floresta Amazônica, utilizando-se para tanto, imagens do satélite LANDSAT.

Para a Amazônia brasileira o monitoramento do desmatamento é realizado através de vários projetos, merecendo destaque para os que utilizam produtos obtidos com sensoriamento remoto, o Projeto de Monitoramento do Desflorestamento na Amazônia Legal (PRODES) e o Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real (DETER), ambos desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE (JÚNIOR, 2007 *et al.*).

Em termos de programas, o PRODES revela, anualmente, as taxas de desflorestamento na Amazônia Legal. Seu objetivo é fazer um levantamento da interferência humana sobre a

floresta Amazônica, mais precisamente na Amazônia Legal Brasileira. Para isso emprega imagens LANDSAT, que são classificadas e interpretadas. A comparação de imagens obtidas em anos sucessivos permite, então, avaliar o desflorestamento temporal (CÂMARA; VALERIANO; SOARES, 2006).

Outra experiência de monitoramento por meio de imagem de satélite empregada na Amazônia Legal Brasileira, é o Sistema de Alerta de Desmatamento - SAD do Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia - AMAZON. O SAD de acordo com o instituto opera desde 2007 monitorando mensalmente com imagens de satélite o desmate e permitindo gerar relatórios mensais sobre as taxas de desmatamento para toda a Amazônia (AMAZON, 2020).

1.2 Estimativa de biomassa e carbono florestal a partir de sensores orbitais

O pioneirismo da metodologia para a obtenção de biomassa acima do solo com uso de sensores orbitais no Brasil foi a avaliação dos índices de biomassa da vegetação acima do solo da região do Cerrado pelas quais foi estimado e correlacionado com dados do sensor “*Thematic Mapper*” do satélite LANDSAT para obtenção destas estimativas. (SANTOS, 1988) citado por WATZLAWICK, 2003).

A metodologia deste trabalho precursor previu o estabelecimento de uma correlação entre os valores de biomassa coletados em campo (métodos destrutivos) com os dados de refletância das bandas espectrais das imagens Landsat. A correlação determinou a melhor banda para o alcance dos objetivos propostos. Ainda relacionado a este trabalho inicial, Watzlawick (2003) enfatiza a importância das técnicas de sensoriamento remoto, principalmente os índices de vegetação na estimativa de biomassa dos cerrados, destacando o monitoramento contínuo desta cobertura.

Tendo como referência Santos (1988), Watzlawick (2003) desenvolveu uma metodologia utilizando imagens do satélite IKONOS II para realizar estimativas de biomassa e carbono orgânico em plantações de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia*, e na Floresta Ombrófila Mista Montana localizada em uma área particular de 4.210,75 ha no município de General Carneiro estado do Paraná. O autor realizou a quantificação da biomassa e do carbono orgânico nas plantações florestais e em área de floresta natural, contemplando a vegetação arbórea, arbustiva, serapilheira acumulada e nas raízes.

Para a obtenção da quantificação de biomassa Watzlawick (2003) utilizou do método destrutivo de forma amostral com a coleta de amostras dos percentis de biomassa da área de

estudo utilizando imagem do satélite Ikonos II. As imagens foram geometricamente e radiometricamente corrigida, e Índices de Vegetação de Diferença Normalizada calculados a partir dos valores médios de refletância nas unidades amostrais para as respectivas bandas da imagem utilizada MS1 (azul), MS2 (verde) MS3 (vermelho) MS4 (infravermelho próximo).

As geotecnologias enquanto ferramenta de auxílio, é capaz de ajudar nos prognósticos para o mapeamento em extensas áreas. A associação destas ferramentas bem como cálculos estatísticos permitem o ajuste de equações possibilitando previsão da estimativa da biomassa e carbono bem como a espacialização desses elementos por meio de mapas de biomassa e carbono florestal estocado.

Esse modelo também foi defendido por Ferraz (2012). Em seu estudo o autor propôs o cálculo de biomassa e carbono também com a utilização de imagem orbital da Ikonos II. Os estudos ocorreram em um fragmento floresta Estacional Semidudamental localizada no município de Viçosa no estado de Minas Gerais. As estimativas de biomassa e carbono foram obtidas por meio de inventário amostral realizado em 15 parcelas de 1.000m² (20mX50m) com a utilização de equações alométricas. O autor optou por melhorar os resultados das estimativas com o processo de ortorretificação das imagens por meio da coleta de pontos de controle geolocalizados em toda a área de estudo, estes pontos foram obtidos pelo processamento de arquivos coletados por um receptor GPS Promark.

Ferraz 2012 destaca ainda que as estimativas de biomassa obtidas por meio do levantamento de campo, foram estimados a partir dos dados do inventário florestal amostral. No total foram levantados os dados de 15 parcelas de 20x50m totalizando uma média de 207 t ha. As estimativas obtidas foram relacionadas com a variáveis digitais de reflectância, ou seja, as respostas espectrais obtidas das quatro bandas multiespectrais nos 12 diferentes índices de vegetação encontrado para a área empregando a análise correlação e regressão (FERRAZ, 2012).

Por meio da matriz de correlação entre as variáveis biomassa obtidos pelo inventário florestal amostral e valores de refletância das bandas e dos índices de vegetação correlacionados, foram selecionadas as imagens que melhor se ajusta ou melhor prediz na obtenção das estimativas de biomassa. Por meio de análise de regressão foram definidos os melhores modelos para a obtenção das estimativas de biomassa revista (FERRAZ, 2012).

Hentz *et al.* (2014), em pesquisa semelhante à de Ferraz (2012), o autor desenvolveu um trabalho cujo objetivo foi o de testar a relação entre três índices de vegetação (NDVI, SAVI

e EVI), com dados de biomassa arbórea em fragmento de floresta ombrófila. Hentz propôs um ajuste de equações a partir das quais fosse possível estimar os valores de biomassa a partir do índice de maior correlação. Para a geração dos índices o autor fez uso da cena do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros. Os dados de biomassa arbórea foram obtidos por meio de inventário florestal em de 4 parcelas instaladas em São João do Triunfo. Desta forma o autor aponta a possibilidade de verificar que o uso de imagens de satélite permite a estimativa da biomassa arbórea com erros aceitáveis, a partir do uso de equações que relacionam o índice de vegetação com os valores de biomassa obtidos em inventários florestais.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Cassol (2013) desenvolveu uma metodologia para as estimativas de biomassa também relacionadas ao uso de imagens orbitais. Seu estudo propôs o uso de três sensores ASTER, o TM e LiSS III para estimar a biomassa e o carbono florestal.

CASSOL, 2013 utilizou dados de campo para validação do método, os dados de inventário florestal de 04 parcelas permanentes, ou seja, parcelas de monitoramento contínuo de acompanhamento do desenvolvimento da estrutura florestal como: circunferência, altura, estado de sanidade e situação de copa em um fragmento de floresta ombrófila mista no município de São João do Triunfo no estado do Paraná.

De acordo com a metodologia proposta o autor destaca ainda que as comparações das estimativas de biomassa se deram pelos valores de biomassa encontrados em cada pixel das imagens utilizadas no estudo. Como cada sensor apresentava resolução espacial diferente, foram estimados os valores para cada sensor para assim chegar ao valor estimado de biomassa e do carbono florestal.

A partir da correlação estabelecida entre os dados biofísicos e os dados espectrais Cassol (2013), e das análises de regressão utilizadas o autor propôs o ajuste de equações para estimar os valores estimados de biomassa e carbono florestal. Como resultado Cassol (2013) obteve os valores estimados de biomassa e do carbono florestal predito para cada sensor utilizado.

1.3 Light Detection and Ranging – LiDAR

O Sistema LiDAR vem se destacando como uma metodologia inovadora e promissora que combina os benefícios do monitoramento terrestre e com os dados de satélite, fornecendo informação de alta precisão em áreas extensas a um custo relativamente baixo. (ROCHA et al. 2023).

O uso destas tecnologias voltadas ao campo da pesquisa em áreas de florestas, tem crescido muito nos últimos anos. No estado do Acre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA/AC vem contribuindo para o desenvolvimento de técnicas de manejo florestal adequadas a pequenos e grandes produtores, promovendo a diminuição de custos e aumento dos rendimentos das operações florestais utilizando o uso do sistema LIDAR - *Ligh Detection and Ranging (Detecção e alcance de luz)*. O LIDAR é um sensor remoto ativo a bordo de plataformas (tripuladas ou não tripuladas) e um método direto de captura de dados, ele possui sua própria fonte de energia, neste caso, uma fonte de luz, a laser. Ele emite feixes de laser na banda do infravermelho próximo (IV) e é capaz de modelar a superfície do terreno tridimensionalmente (ALMEIDA *et tal.* INPE).

Giongo et al (2010), aponta outra característica importante desse sensor, os pulsos de laser podem penetrar por pequenas aberturas no dossel da floresta e fornecer informações sobre a estrutura florestal e sobre o relevo dessas áreas. Nessa perspectiva, Means *et al.* (1999) citado por Andersen *et al.* (2003) afirma que a tecnologia de digitalização LIDAR tem o potencial de fornecer informações sobre o espaço estrutural em toda a profundidade da floresta, copa e sub-bosque, por essas características podem ser usados em grandes áreas para caracterizar a distribuição vertical do dossel.

Para Figueiredo (2014), o uso da tecnologia LIDAR tem sido utilizado para planejamento em atividades florestais, bem como instrumento de mensuração. Para o autor, essa tendência de modernização das técnicas de planejamento florestal deve se manter e a Embrapa propõe elevar as suas tecnologias a um novo patamar agora com o uso da tecnologia LIDAR aerotransportado com o intuito melhorar os trabalhos florestais com elevada precisão, larga escala e economicidade.

Para Lefsky (2002), os instrumentos LIDAR medem diretamente a estrutura vertical de florestas determinando a distância entre o sensor e um alvo através da medição precisa do tempo entre a emissão de um pulso de luz laser do sensor e o tempo de detecção da luz refletida do alvo. Em seu estudo o autor calculou as estimativas de altura do dossel, cobertura do dossel e altura por densidade do dossel foram calculadas a partir dos dados do lidar.

Por meio de análise de regressão foram comparadas as relações entre as informações LIDAR e a estrutura de copa estimada a partir do levantamento de campo de biomassa acima do solo. O autor do estudo aponta que encontrou boa correlação entre os dados, quase todos os

índices de estrutura do dossel foram significativamente correlacionados com a biomassa acima do solo.

Amorim (2016) destaca que a evolução do Sensoriamento Remoto com o uso do sistema LiDAR possibilita obter modelos digitais de terreno (MDT), curvas de Nível, modelos digitais de Elevação (MDE), modelos digitais de altura das árvores (MDAA), Cálculos de Biomassa, entre outros. Neste trabalho Amorim (2016) realizou a quantificação do volume de biomassa e a altura média das árvores dominantes de uma floresta remanescente de Mata Atlântica por meio de LIDAR aerotransportado. “Para a aquisição dos dados LiDAR, foi realizado um único sobrevoo com um equipamento ALTM3100 da empresa canadense Optech embarcado em uma aeronave SENECA II.” (AMORIM, 2016).

Como resultado deste estudo Amorim (2016) destaca o cruzamento dos dados entre a campanha de campo e o levantamento utilizando o Sensoriamento Remoto, pelas quais obtiveram resultados próximos. Para o autor o levantamento por meio do sistema LiDAR, mostrou poucas variações em relação ao método de área fixa por inventário florestal, sendo que nas 3 parcelas mensuradas foram encontrados entre 3 e 4 mil metros cúbicos de biomassa, enquanto em 1 parcela o número de biomassa encontrado variou entre 8 e 9 mil metros cúbicos.

Amorim (2016) aponta ainda que, o Cerrado apresenta uma estimativa de cerca de 5.71 mil metros cúbicos de biomassa, e a floresta Amazônica cerca de 10.05 mil metros cúbicos. Portanto os valores encontrados para as medições tanto pelo método LIDAR, quanto pelos levantamentos de campo, se apresentaram de forma normal sem grandes discrepâncias, quando comparados com valores de outras coberturas florestais.

1.4 UAV-LiDAR

Recentemente melhorias na tecnologia permitiram o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) ou mais comumente conhecidos como drones, como plataforma alternativa de sensoriamento remoto. Tais tecnologias oferece uma combinação distinta de captura de dados de alta resolução a um custo de pesquisa significativamente menor. (WALLACE, 2012).

No que se refere ao seu uso Lefsky (2002), afirma que a utilização é confiável sob tudo na obtenção de informações sobre biomassa acima do solo, devido ao potencial de penetração no dossel da floresta. Nessa perspectiva Rocha et al. (2023) desenvolveu um uma pesquisa sobre estimativa de biomassa acima do solo a partir dados gerados pelo sistema LiDAR UAV Gartoreye. O trabalho teve como objetivo estimar biomassa acima do solo de uma porção de floresta da Unidade de Conservação Reserva Extrativista Chico Mendes, com a utilização do

LiDAR. Os resultados das análises obtidas pelo método foram comparados com os dados provenientes do inventário florestal realizados na referida área de estudo.

Para os autores as estimativas médias de biomassa obtidas com os dados coletados em campo foram em média 13.56 Mg ha⁻¹ enquanto pelo sistema GatorEye considerando as 160 subparcelas e duas variáveis preditoras foi de 16.42 Mg ha⁻¹. Embora observada variação entre estimativa modelada e estimativas derivadas de campo, pode-se observar que a média obtida com os dados de campo foi bem próxima da obtida pelo LiDAR, com isso pode-se afirmar que o referido método pode ser utilizado de forma eficaz, apesar da pesquisa ainda encontrar-se em andamento com possibilidades de novos ajustes. (ROCHA et al. 2023)

1.5 Global Ecosystem Dynamics Investigation - GEDI

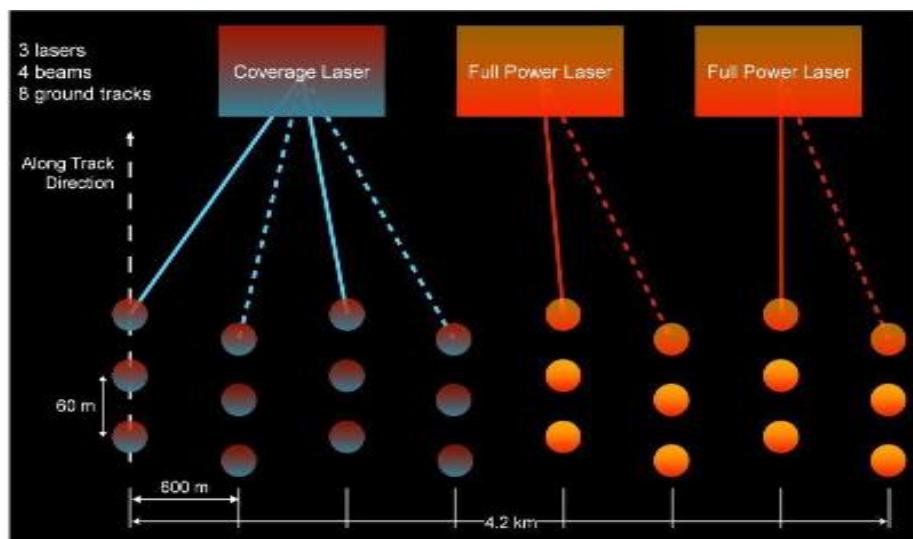
O uso de sensores orbitais já é utilizado em diversos estudos em áreas de florestas nativas da Amazônia. Atualmente, novos sensores orbitais têm sido atualizados, como é o caso do recentemente lançado sensor orbital da Agência Espacial Americana - NASA o Global Ecosystem Dynamics Investigation - GEDI, que registra a estrutura da floresta em formato 3D. (BRASIL, 2019). O GEDI é uma tecnologia Lidar Light Detection and Ranging (Detecção e Alcance de Luz) que pode fornecer dados da estrutura da floresta de maneira a possibilitar as estimativas dos índices de biomassa e carbono presente na estrutura da floresta. A mensuração da biomassa é composta pela folhagem, galhos e troncos que são rastreados pelo sensor lidar GEDI permitindo sua quantificação (BRASIL, 2019).

Pesquisadores e gerentes florestais trabalhando para registrar e reduzir a rápida perda de florestas, dispõe agora desta nova ferramenta para monitorar a vegetação em todo o mundo. O instrumento GEDI projetado pela NASA foi lançado até a Estação Espacial Internacional em dezembro de 2018, em um foguete SpaceX (BRASIL, 2019). De acordo com site GEDI Ecossistema, os modelos dinâmicos de vegetação representam fatores que influenciam como, onde e que tipo de vegetação cresce em um determinado local. Modelos de vegetação que representam a floresta como árvores individuais ou mesmo por meio de cortes podendo apresentar informações sobre altura do dossel, forma do dossel, índice de área foliar, biomassa e outras características da vegetação para melhorar a precisão das projeções do modelo de variáveis como fluxo de carbono em paisagens heterogêneas.

O instrumento GEDI é um sistema de laser de classe geodésica, detecção e alcance de luz (lidar) composto por 3 lasers que produzem 8 faixas paralelas de observações. Na figura 01 pode-se observar o esquema ilustrativo dos 03 sensores que disparam os lasers GEDI. Cada

laser dispara 242 vezes por segundo e ilumina um ponto de 25 m (uma pegada) na superfície sobre a qual a estrutura 3D é medida. Cada pegada é separada por 60 m ao longo da pista, com uma distância de cerca de 600 m entre cada uma das 8 pistas. O GEDI espera produzir cerca de 10 bilhões de observações sem nuvens durante sua missão nominal de 24 meses (DUBAYAH *et al.* 2022).

Figura 01 - Esquema ilustrativo dos 3 Lasers disparando ondas sobre a superfície terrestre e área de abrangência na superfície.



Fonte: GEDI, 2022

Os dados GEDI estão disponíveis para cientistas e pesquisadores para monitoramento de florestas nativas do planeta. Nessa perspectiva utilizar o banco de dados fornecido pelo GEDI será mais uma opção para se avaliar a cobertura floresta na região sul ocidental da Amazônia. Isto, permitirá estimar biomassa e posterior o quantitativo de carbono. O presente estudo pressupõe avaliar mais uma alternativa para quantificação de carbono de maneira remota associado ao Sistema de informação Geográfica acelerando assim as possibilidades de coleta de informação das florestas nativas da região.

Um dos benefícios do GEDI é a capacidade de coletar dados da estrutura da floresta em três dimensões, o que permite categorizar diferentes tipos de cobertura, mas também registrar a altura da copa da vegetação e a densidade das árvores, que outros sensores satélites não conseguem. Os lasers do GEDI apresentam a capacidade de penetrar o dossel da floresta para mapear o crescimento do sub-bosque, vigilância que nenhum satélite até hoje conseguiu fazer

e seria praticamente impossível sem o difícil trabalho de campo de medir a biomassa florestal e o armazenamento de carbono do solo (BRASIL, 2019).

As medições precisas do instrumento GEDI da altura do dossel florestal, da estrutura vertical do dossel e da elevação da superfície aumentam muito a capacidade de caracterizar importantes processos de ciclagem de carbono e água, biodiversidade e habitat. Dados sobre a estrutura da superfície também são de imenso valor para previsão do tempo, manejo florestal, monitoramento de geleiras e neve e a geração de modelos digitais de elevação mais precisos. O GEDI fornece a peça que faltava – a estrutura 3D – nos ativos observacionais da NASA, que nos permite entender melhor como a Terra se comporta como um sistema e orienta as ações que podemos tomar para sustentar recursos críticos (BRASIL, 2019). Os dados do GEDI fornecem medições globalmente consistentes da estrutura vertical do dossel da vegetação nos ecossistemas temperados e tropicais do mundo. (GEDI, 2022). Os dados são recentes, disponibilizados desde 17/04/2019 a 13/04/2022 (GEDI, 2022).

1.6 Biomassa Florestal

De acordo com Schikowski, Corte, Sanquette (2013) a biomassa florestal é definida como “a quantidade em massa de material vegetal estocada em uma floresta.” E é formada pelo resultado do consumo de parte do produto da fotossíntese no processo da respiração, sendo o remanescente incorporado como matéria à planta, denominando-se assim de produção líquida. A Biomassa florestal, portanto, pode ser entendida como “a quantidade, em massa, de material de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal” (SANQUETA E BALBINOT, 2004 citado por CASSOL, 2013).

Martinelli *et al* (1994) citado por Silveira *et al* (2008), destaca a biomassa como “a quantidade expressa em massa do material vegetal disponível em uma floresta, sendo que os componentes de biomassa geralmente estimados são a biomassa viva horizontal acima do solo, composta de árvores e arbustos, a biomassa morta acima do solo, composta pela serapilheira e troncos caídos, e a biomassa abaixo do solo, composta pelas raízes. A biomassa total é dada pela soma de todos esses componentes.”

Para Castro & Kauffman (1998) a biomassa vegetal arbórea é formada por uma porção aérea e outra subterrânea. Ainda na concepção dos autores “a proporção da distribuição dessa biomassa não é constante para todos os indivíduos, ainda que pertencentes à mesma espécie. Tal variação se deve a fatores como características genéticas, idade e condições do ambiente.”

Estudos relacionados a biomassa florestal estão quase sempre relacionados a obtenção de estimativas de forma direta e de forma indireta (HIGUCHI et al, 1998). Os métodos diretos fazem uso de inventários florestais e implicam determinações, pelo fato de as árvores serem cortadas e seus componentes separados e pesados (SILVEIRA P. *et al.* 2021). O método indireto além dos dados provenientes de inventários florestais, se faz uso de equações alométricas e técnicas de sensoriamento remoto - SR (SILVEIRA P. *et al.* 2021). Este último método tem sido amplamente utilizado em estudos na área florestal, uma vez que é possível estimar parâmetros biofísicos, como biomassa, carbono e volume de madeira, pelas propriedades espectrais dos componentes da vegetação, tais como troncos, galhos, folhas (SILVEIRA P. *et al.* 2021).

Silveira (2008), relata que a estimativa de biomassa pelo método indireto consiste em relacioná-la com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal. As estimativas podem ser feitas por meio de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões de dados provenientes de inventários florestais (DAP, altura e volume), por dados de sensoriamento remoto (imagens de satélite) e utilizando-se uma base de dados em um sistema de informação geográfica SIG (SILVEIRA *et al.* 2008).

Nessa perspectiva o uso de métodos indiretos não pode desprezar outras informações pertinentes e relacionadas à área de estudo, entre elas as coletadas em campo. Em estudos que envolvam cálculos e biomassa e carbono, a mensuração da biomassa florestal de uma determinada área de floresta, é uma etapa importante a ser seguida, pois, é por meio da determinação da biomassa que se consegue chegar a mensuração dos percentuais de estoque de carbono contido nessas florestas.

1.7 Carbono Florestal

A floresta é um importante meio de absorção de CO₂, pois, em seu processo de crescimento a floresta acaba incorporando o CO₂ pelo processo de fotossíntese e crescimento das árvores. Dessa forma, a floresta pode atuar como um sumidouro, onde as árvores absorvem carbono durante a fotossíntese e armazenam o excesso na forma de biomassa (HIGUCHI *et al.* 2004).

Para Chang (2002) as plantas verdes são responsáveis pela absorção de CO₂ durante a fotossíntese, processo pelo qual as florestas podem estocar dois terços do carbono terrestre equivalente a um trilhão de toneladas. Para o autor em todo o reino vegetal, as florestas proporcionam o mais longo do ciclo de estocagem de carbono, em forma de madeira e

acumulação no solo por centenas de anos antes de retornar à atmosfera através da respiração, decomposição, erosão ou queima.

Nos debates sobre a questão do sequestro de carbono, existe interesse maior voltado às florestas tropicais úmidas (como as do Brasil), pois estas são caracterizadas pela alta taxa de produtividade primária (CHANG, 2002). O autor reforça as ideias de Higuchi *et al.* (2004) quando afirma que é precisamente na fase de crescimento que as árvores removem e retêm quantidades significativas de carbono da atmosfera.

Todo esse carbono armazenado precisa ser melhor compreendido e melhor mensurado, para isso a obtenção de estimativas confiáveis sobre taxas de desmatamento e dos estoques de carbono da vegetação é essencial para que se consiga obter as estimativas e a quantidade de carbono emitida ou sequestrada (HIGUCHI *et al.* 2004).

De acordo com a literatura, os mecanismos para a obtenção da quantificação do carbono, parte inicialmente do conhecimento da quantidade de biomassa. Determinada a quantificação de biomassa, a etapa seguinte é a determinação dos quantitativos de carbono por meio de cálculos pré-estabelecidos. A estimativa do estoque de carbono da vegetação pode ser obtida pelo produto da biomassa florestal e concentração de carbono HIGUCHI *et al.* 2004).

Para Chang (2002), no que se refere à função da floresta enquanto sumidouro, há, portanto, algumas incertezas que suscitam discussões relevantes. A primeira diz respeito à retenção de carbono pelas árvores, de acordo com o autor a maior retenção se dá durante a fase de crescimento das árvores estabilizando-se na fase adulta. A segunda incerteza refere-se às plantações florestais, que não têm aliviado as pressões sobre as florestas, mas constituem a causa direta de sua destruição. E por fim aponta sobre a eficiência da retenção de carbono em florestas, ou seja, envolve discussões em que considera que um dia a madeira de uma área será decomposta e o carbono voltará para a atmosfera.

Conhecer em quantidade os estoques de carbono contido nessas florestas, é de suma importância. Essa questão interessa para as discussões referente aos índices de emissões de CO₂ lançados na atmosfera e que podem contribuir no aumento da temperatura da terra. Outras discussões que demandam são os projetos de REDD já discutidos na seção anterior, esses projetos também visam conhecer os índices de carbono presente nas florestas.

1.8 Índices de Vegetação (IVs)

Para Chuvieco e Huete (2010) citado por Ferraz (2012), os índices de vegetação são utilizados para extrair informações relacionadas à vegetação, com base nos pixels de uma

imagem digital. Estes índices envolvem transformações espectrais entre duas ou mais bandas do espectro eletromagnético.

Diversos trabalhos de pesquisa já utilizaram o Índice de Vegetação no campo do sensoriamento remoto. Vários desses índices de vegetação têm sido desenvolvidos com o objetivo de entender a variáveis de vegetação. Estes estudos têm mostrado que os índices estão relacionados às várias propriedades da vegetação, como o índice de área foliar, a biomassa, água e fenologia e vigor da vegetação. (FERRAZ, 2012).

Através das imagens orbitais, é possível a realização das análises de correlação entre a localização espacial de alvos do meio ambiente, variação espectral da imagem e variação da cobertura vegetal dos solos. A atualização dos dados também ficou extremamente facilitada, uma vez que, montada a base de dados, ficou muito fácil produzir uma cobertura vegetal atualizada do solo, obtendo assim um resultado dinâmico e, portanto, mais próximo do real. (BAROTTO e GOMIDE, 2013).

O trabalho desenvolvido pelos autores acima citados propôs gerar a variação das condições da cobertura do solo, o estudo foi realizado no Norte de Minas, a partir de análises espetrais de Imagens de satélite Landsat-5 TM por meio de técnicas de sensoriamento remoto e SIG, aplicando o cálculo da índices de vegetação (Índice de Vegetação na região estudada. Como resultado da cobertura vegetal, mostraram as mudanças de vegetação nas diferentes áreas da região, baseado nos índices de vegetação estudados. (BAROTTO e GOMIDE, 2013).

Outro estudo relacionado a Índices de Vegetação foi aplicado por Lopes et al. (2010) Este estudo foi aplicado à bacia do rio Brígida local a exploração intensa dos recursos naturais. Para o autor a quantificação, a avaliação de risco e o monitoramento da desertificação, podem ser realizados a partir de parâmetros biofísicos (tais como, índices de vegetação) e físicos (albedo, temperatura, emissividade, dentre outros) obtidos por meio de imagens orbitais, para determinação de mudanças na superfície.

O referido estudo teve como objetivo avaliar a importância dos parâmetros de temperatura da superfície e o NDVI *Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada) na quantificação das mudanças ocorridas entre os anos de 1985 e 2001, na área afetada pelos processos de desertificação na Bacia do Rio Brígida (Pernambuco), por meio de imagens do sensor TM - Landsat 5.

CAPÍTULO 2

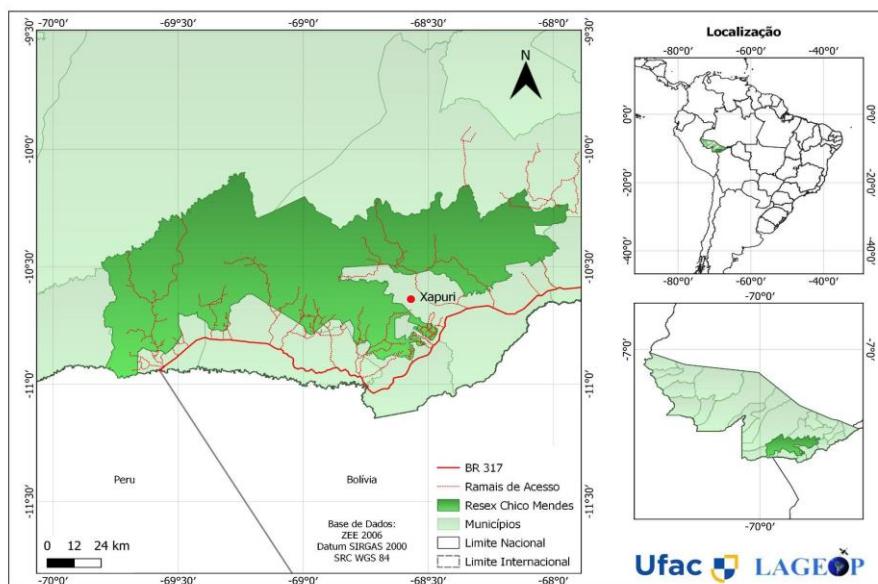
2.0 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Reserva Extrativista Chico Mendes é uma unidade de conservação federal criada em 1990 (Decreto n.º 99.144, de 12/03/1990), apresenta uma extensão de 970.570ha. Em 2009 ela abrangia 46 seringais e tinha uma população de 10.000 pessoas (MASCARENHAS; BROWN; SILVA, 2018). De acordo com Fittipaldi e Castelo (2021) em 2009 ano do último senso socioambiental realizado na Resex Chico Mendes, a população reduziu para 8.220 habitantes, distribuídos entre 1.800 famílias, com uma média de 4,11membros em cada uma delas.

Localizada na região sudeste do estado do Acre, Brasil e abrange parte dos territórios dos municípios de Rio Branco, Xapuri, Brasiléia, Epitaciolândia, Sena Madureira, Assis Brasil e Capixaba. (MASCARENHAS; BROWN; SILVA, 2018).

O acesso à Reserva pode ser feito por via rodoviária pela BR-317 e por via fluvial, pelo Rio Xapuri e afluentes, exceto no período de seca, quando praticamente não é possível a navegação devido ao baixo nível de água. Outro acesso viável é pela parte mais ocidental da Reserva, no município de Sena Madureira, pelo Rio Iaco e Rio Macauã e seus afluentes. Por via aérea, é possível chegar a todas as cidades no entorno da Reserva que possuam campo de pouso, sendo o principal o Aeroporto Internacional de Rio Branco. (PM RESEX CM, 2011).

Figura 02 – Mapa de Localização da Reserva Extrativista Chico Mendes.



Fonte: Autor, 2023.

Em relação aos aspectos ambientais, a Reserva Extrativista Chico Mendes, por ser uma Unidade de Conservação de Uso Direto, possui um uso do solo bastante restrito devido a seu Plano de Manejo e próprias Limitações apontadas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC. (PMFMC, 2011).

Em termos econômicos a atividade extrativista da coleta da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e borracha (*Hevea* sp) alguns pontos de extração de óleo de copaíba (*Copaifera* sp.) e sementes ainda é praticada. O plano de Uso da RESEX também prevê para a pecuária, um máximo de 50 % da área da colocação destinada para usos não complementares. (PMFMC, 2011).

Assim sendo, trata-se de uma importante área de cobertura florestal disponível e legalmente instituída com regras estabelecidas para utilização de seus recursos naturais. Analisar a estrutura da floresta para obtenção de índices de biomassa e carbono, trará contribuições relevantes sobre o potencial florestal da área, contribuindo para tomada de decisões de gestores em ações voltadas ao desenvolvimento das comunidades tradicionais que vivem e residem há décadas nessas áreas. A figura abaixo mostra a localização espacial da Unidade de Conservação e seu contexto de proximidade com a Estrada BR 317 e da região de fronteira com a Bolívia e o Peru.

2.1 Características físicas

2.1.1 Solos

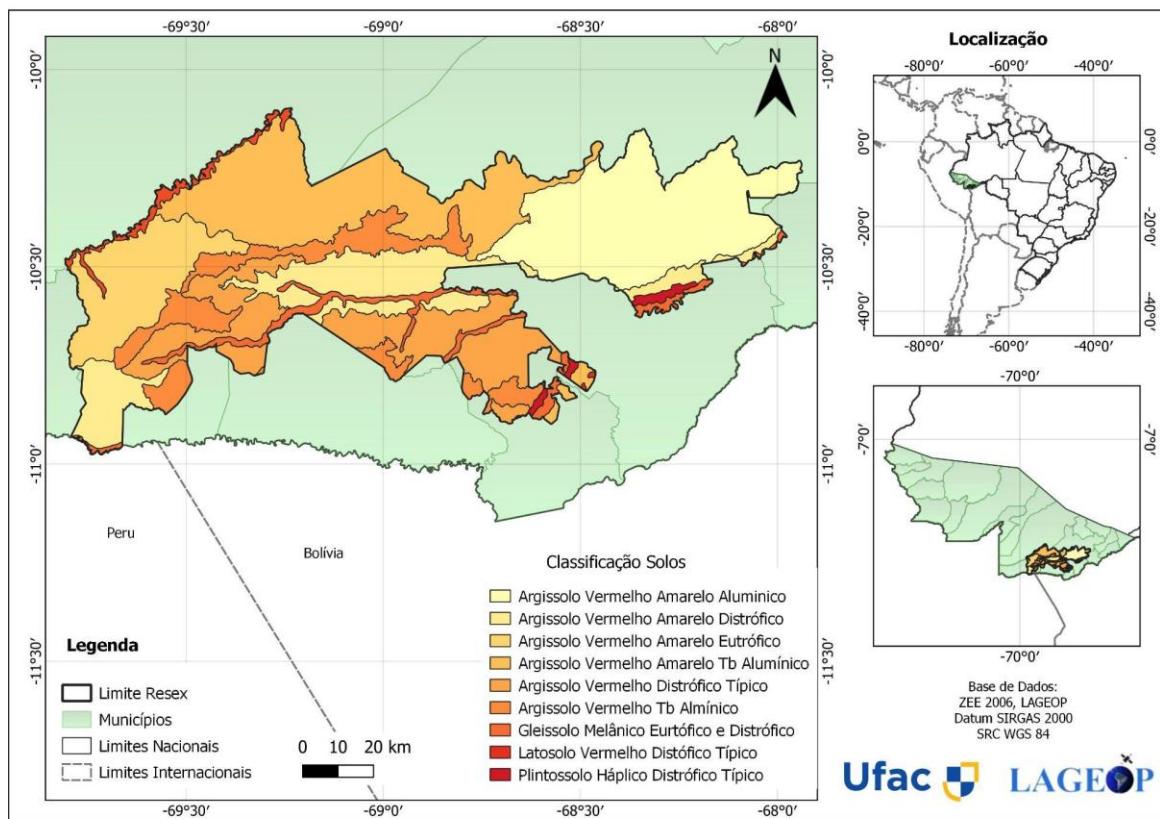
A principal tipologia de solo encontrado na área, utilizando o sistema brasileiro de classificação de solos é o “ARGISSOLO” representando aproximadamente 95% à área da RESEX. Esse solo é caracterizado por possuir um horizonte B textural (incremento significativo de argila do horizonte A para o horizonte B) e baixa atividade de argila, muitos deles com alta saturação por alumínio. Em muitos casos são solos que apresentam drenagem moderada e baixa ou média fertilidade natural, em razão do predomínio de minerais de argila de baixa atividade. Por estarem muitas vezes associados às condições de relevo mais movimentado, são também bastante suscetíveis à erosão” (PMFMC, 2011). De acordo com o Zoneamento Ecológico Econômico - ZEE do Acre, a RESEX apresenta 9 tipos de solos com predominância de Argissolo conforme discriminado no Quadro 01 abaixo.

Quadro 01 - Tipos de solos encontrados na Reserva Extrativista Chico Mendes.

Classe	Identificação das classes de solos
PVAb4	Argissolo Vermelho Amarelo Alumínico - textura média/argilosa, A moderado, álico, hipoférrego, profundo, fortemente ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo suave ondulado a ondulado;
PVAd3	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico - textura média/argilosa, A fraco, álico, pouco profundo, ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado;
PVAe4	Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico - textura arenosa/argilosa, A fraco, mesoférrego, profundo, fortemente ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado;
PVAb2	Argissolo Vermelho Amarelo Tb Alumínico - textura média/argilosa, A moderado, álico, hipoférrego, profundo, fortemente ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo suave ondulado a ondulado;
PVd2	Argissolo Vermelho Distrófico Típico - textura média/argilosa, A moderado, álico, mesoférrego, profundo, fortemente ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado;
PVba	Argissolo Vermelho Tb Alumínico - textura média/argilosa, A moderado, álico, hipoférrego, profundo, fortemente ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo suave ondulado a ondulado
GM5	Gleissolo Melânico Eutrófico e Distrófico - textura argilosa, A moderado, raso, moderadamente ácido, fase floresta tropical subperenifólia de várzea, relevo plano;
LVd4	Latossolo Vermelho Distrófico Típico - textura argilosa, a moderado, hipodistrófico, álico, silicosa, caulinítico, muito profundo, ácido, fase floresta tropical perenifólia, relevo suave ondulado;
FXd4	Plintossolo Háplico Distrófico Típico - textura média/argilosa, A moderado, profundo, ácido, fase floresta tropical subperenifólia, relevo plano a suave ondulado.

Na sequência da Figura 03 observa-se a distribuição espacial com os principais tipos de solos que predominam na área de estudo de acordo com o ZEE ACRE 2006.

Figura 03 – Mapa Pedológico da Reserva Extrativista Chico Mendes.



Fonte: Autor 2023

A variação pedológica da Resex Chico Mendes pode ser explicada pelo processo de formação do solo dessa região, ou seja, o tipo de material rochoso que deu origem as diferentes classes pedológicas dessa região, além dos processos químicos e mineralógicos que ao longo de milhões de anos permitiu a formação pedológica ora apresentada.

2.1.2 Hidrografia

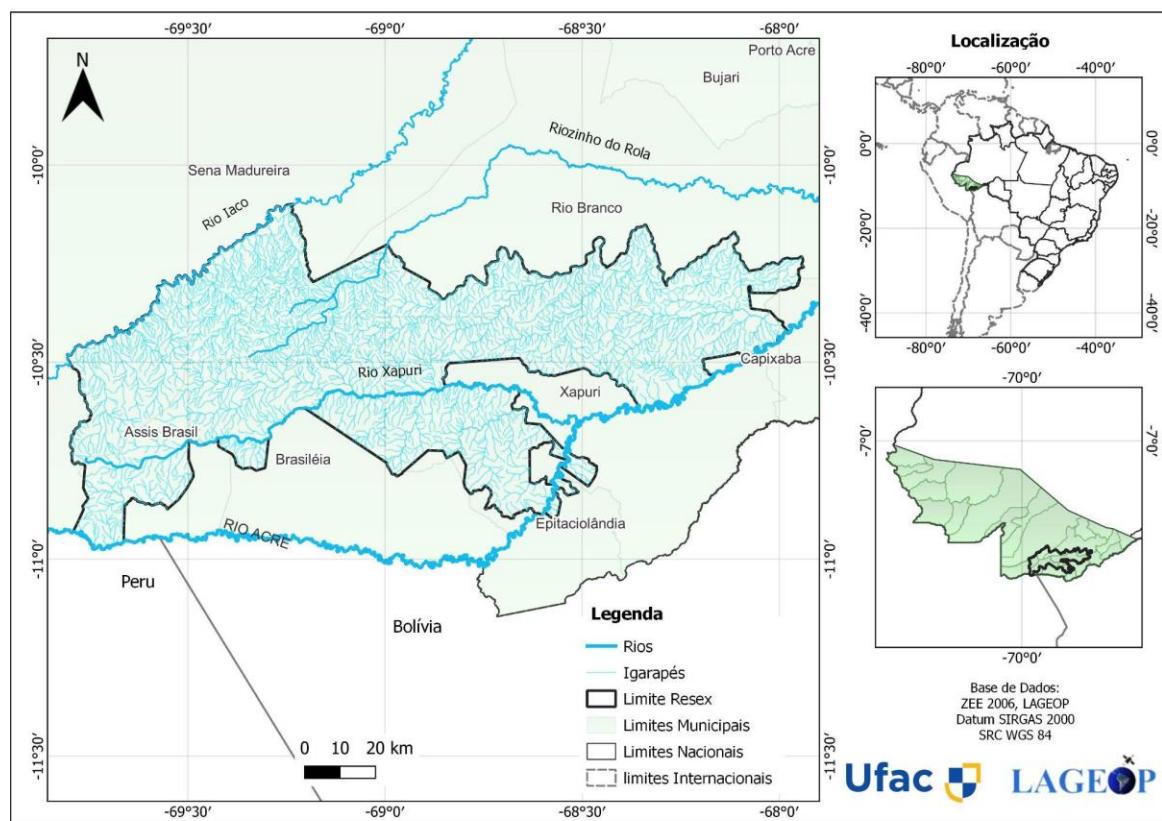
A rede hidrográfica da Reserva Extrativista Chico Mendes está representada por dois rios principais, o Rio Acre e o Rio Iaco, afluentes da margem direita do curso superior do Rio Purus. Os afluentes da bacia do Acre, dentro da reserva, cortam a sua maior parte e estendem-se no sentido oeste-leste. O Rio Acre margeia a Reserva nas proximidades do Município de Assis Brasil e segue pela fronteira entre o Brasil, Peru e Bolívia, entrando em território brasileiro no município de Brasiléia (PMRCM, 2006).

O Rio Acre apresenta um leito encaixado sendo suas cheias caracterizadas por acentuada elevação do nível d'água e inundação de pequena extensão de áreas mais baixas. Os picos de cheias são observados no período de fevereiro a abril, sendo os meses de julho a

setembro caracterizados pelo maior déficit hídrico (PMRCM, 2006). O Rio Iaco na porção mais a noroeste faz divisa com o município de Sena Madureira.

A Resex também abriga a nascente do Riozinho do Rola afluente do Rio Acre. Esses mananciais com seus inúmeros igarapés tributários formam as bacias hidrográficas que banham todo o território da Reserva Extrativista Chico Mendes. A distribuição dos principais mananciais e seus tributários são apresentados no Mapa Hidrográfico representado pela Figura 04 abaixo, o mapa traz um panorama das principais bacias de drenagem da área.

Figura 04 – Mapa Hidrográfico da Reserva Extrativista Chico Mendes.



Fonte: Autor 2023

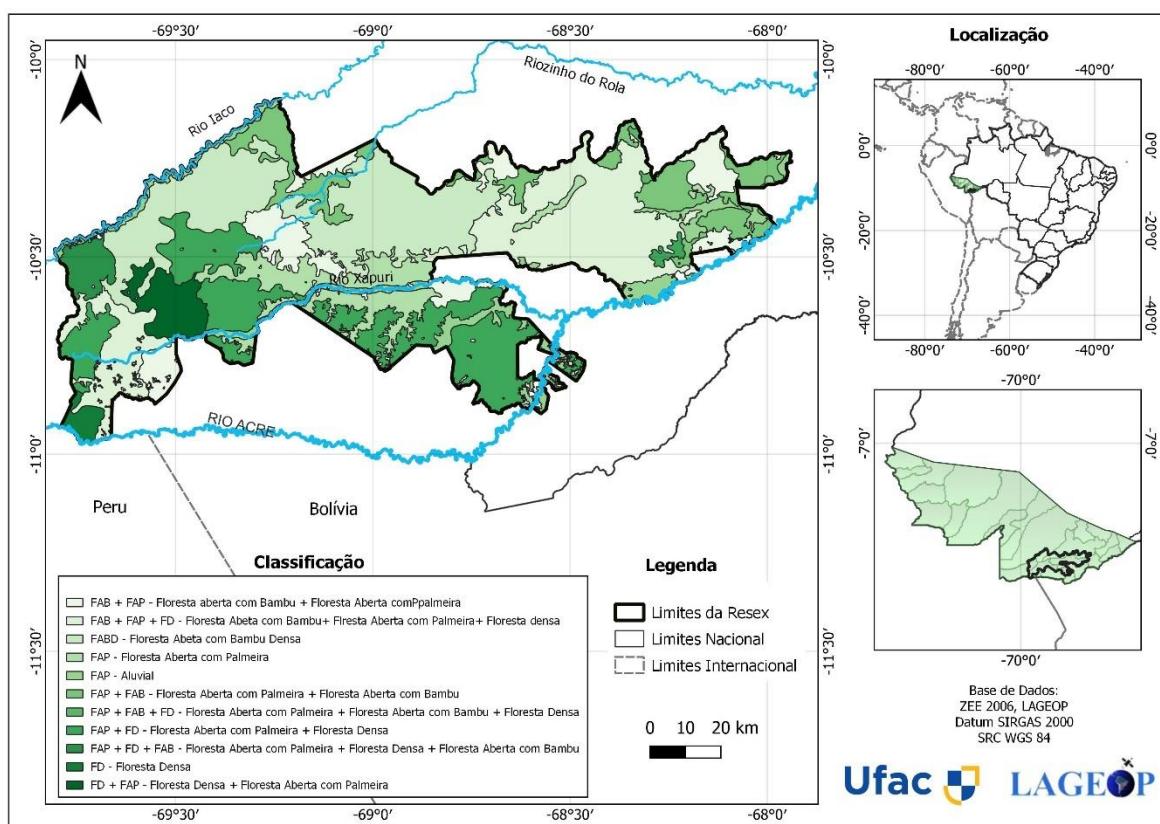
Observa-se a importância dessa Unidade de Conservação em relação a conservação dos inúmeros mananciais que banham a área. Ao longo dos anos e com o perca da cobertura florestal este em risco também as áreas de preservação permanente desses mananciais, que por sua vez são responsáveis por alimentar no conceito de bacia hidrográfica os periciais rios que drenam a região, como resultado pode-se prever um cenário de assoreamento mais severo

e com isso encheates com maior expansão, ou seja, um distúrbio ambiental que pode acarretar outros.

2.1.3 Tipologias Florestais

No que se refere às tipologias florestais, a área de abrangência da RESEX Chico Mendes apresenta 12 unidades de mapeamento das tipologias florestais, incluindo áreas antropizadas. Dessas, a tipologia predominante é a Floresta Aberta com presença de Bambu Densa com aproximadamente 22% da área total. De maneira geral essa é a principal tipologia de Floresta que predomina na RESEX com suas fisionomias associadas. (PMFSC AMOPREX, 2017). Conforme ilustrado pela Figura 05 abaixo é possível a visualização da distribuição espacial das principais tipologias de acordo com a classificação do ZEE ACRE 2006.

Figura 05 – Mapa das Tipologias Florestais da Reserva Extrativista Chico Mendes.



Fonte: Autor 2023

De acordo com (PMFSC AMOPREAB, 2018) o primeiro levantamento de descrição da tipologia da vegetação para o estado do Acre foi feito pelo projeto RADAM BRASIL e foram identificados para a Resex Chico Mendes duas unidades fitoecológicas: Floresta

Tropical Densa e Floresta Tropical Aberta. Ainda de acordo com o documento na Resex apenas 27% são florestas densas e os restantes 73% compostos por florestas abertas.

No que se refere a classe Floresta Tropical Densa esta é caracterizada por sub-bosque denso e vegetação arbórea em crescimento e em regeneração na maioria das vezes, proveniente de espécies arbóreas e se subdivide em Floresta Densa das Terras Baixas, Relevo Ondulado - Fdo e Floresta Densa dos Relevos Dissecados em Cristas e Colinas - Fda. De acordo com o documento (ZEE, 2006) essa tipologia é formada por áreas onde a concentração de bambus é grande que muitas vezes chega ao dossel dominando a vegetação. Ainda de acordo com o documento nessas áreas o sub-bosque é denso, com árvores de pequeno porte, e indivíduos mais grande esparsos e pouco frequentes.

Em relação a segunda classe Floresta Tropical Aberta é “caracterizado pela dispersão sobre terras baixas, cobertas por arenito Terciário, nos terraços aluviais do Quaternário e nos terrenos submontanos” (PM RESEX, 2006), e subdivide-se nas seguintes formações: Floresta Ombrófila Aberta com palmeiras e cipós - Fac, Floresta Ombrófila Aberta com palmeiras e cipós - Fac, Floresta Ombrófila Aberta com bambu, Floresta aberta de cipó, Floresta aberta de palmeira, Floresta aberta de bambu (PM RESEX, 2006).

CAPÍTULO 3

3.0 ESTIMATIVAS DE BIOMASSA E CARBONO FLORESTAL ACIMA DO SOLO A PARTIR DE DADOS GEDI E IMAGENS MULTIESPECTRAIS LANDSAT 8

3.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento mais preciso dos estoques de biomassa florestal são uma das maiores incertezas no ciclo global do carbono e sua estimativa em escala local ainda é um grande desafio mesmo com o uso da ferramenta do sensoriamento remoto (DUBAYAH *et al.* 2022). Pesquisas dessa natureza são relevantes uma vez que na atualidade as questões relacionadas ao meio ambiente, principalmente ligadas a manutenção das florestas estão cada dia mais em evidência. Assim, um dos desafios relacionados ao assunto em tela é o desenvolvimento de estudos que gerem cada vez mais informações técnicas relacionadas ao quantitativo dos estoques de biomassa e da dinâmica do carbono florestal.

Hentz *et al.* (2014) faz referência ao uso das tecnologias como ferramenta de análise. Para o autor o uso das tecnologias provenientes do sensoriamento remoto, com uso de imagens de satélite, demonstram ser alternativa efetiva nas análises da cobertura vegetal, pois, permitem acompanhar as contínuas modificações na estrutura da floresta como por exemplo: altura da floresta, estrutura do dossel e diversidade. A estrutura florestal se torna assim essencial para quantificar biomassa e carbono ocorrentes na dinâmica de um ecossistema florestal.

As técnicas de sensoriamento remoto, principalmente as que envolvem sensores orbitais ativos multiespectrais têm sido utilizadas e de certa forma constatado sua eficiência na realização de estudos que envolvem monitoramento da floresta. Estas técnicas demonstraram ser efetivas na análise da cobertura vegetal, pois permitem acompanhar as contínuas mudanças no crescimento, acúmulo de biomassa e carbono florestal (HENTZ *et tal.* 2014). Apesar de um método já bastante difundido, a mensuração da biomassa ainda é realizada principalmente por meio de métodos convencionais, ou seja, destrutivos. (CASSOL, 2013).

Dentre as possibilidades de uso do sensoriamento remoto, o uso de imagens como Índices de Vegetação já é bem difundido sobretudo no campo da agricultura como por exemplo no cultivo da soja (TRINDADE *et al.* 2018). Para os autores os Índices de Vegetação são responsáveis pela representação da resposta espectral da vegetação, ou seja, esses índices medem o vigor vegetativo da cultura, a qual pode ser afetada por fatores ambientais, de manejo, do clima ou mesmo por condições desenvolvidas pela própria vegetação. Esses índices

colaboram com as análises espaciais, nesse caso os índices serviram como análise na correlação entre as respostas espectrais das imagens utilizadas com os dados GEDI.

Nessa perspectiva, o presente estudo propõe testar a metodologia para mensuração de biomassa acima do solo, com a utilização de imagens multiespectrais Landsat 8, sensor OLI e Índices de Vegetação associado a dados do sistema GEDI, com objetivo de obter a estimativa de biomassa florestal acima do solo em 37 Unidades de Trabalho localizadas na área de Manejo Florestal Comunitário na Reserva Extrativista Chico Mendes no município de Xapuri no estado do Acre.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

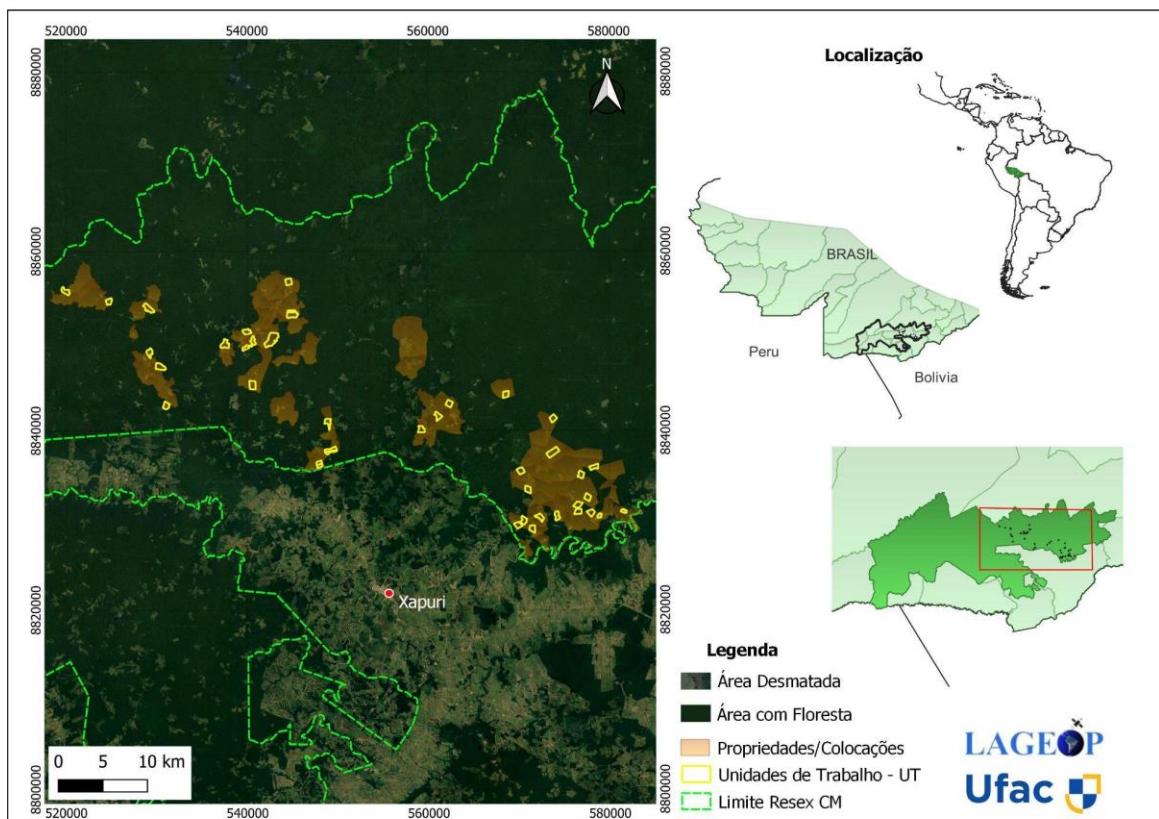
A análise metodológica desse capítulo, apresenta um caráter quantitativo uma vez que se propôs analisar diferentes tipos de dados orbitais (multiespectral e lidar), para predizer os valores de biomassa e carbono acima do solo. A análise utiliza como suporte ferramentas de geoprocessamento e cálculos estatísticos para obter informações quantitativas considerando um recorte espaço temporal pré-determinado

3.2.1 Localização da área de estudo

Foram consideradas 37 Unidades de Trabalho (polígonos na cor amarelo) referentes a uma área de manejo florestal comunitário da Associação de Moradores da Reserva Extrativista Chico Mendes - AMOPREX. Estas Unidades de trabalho estão localizadas em uma das maiores Unidade de Conservação do Estado do Acre, a Reserva Extrativista Chico Mendes (PMFSC, 2017).

A figura 06 abaixo mostra a localização das Unidades de Trabalho (polígonos na cor amarelo) onde foram realizadas as estimativas de biomassa e do carbono florestal acima do solo. Os polígonos na cor alaranjada são as propriedades/colocações onde localizam-se as Unidades de Trabalho submetidas à pesquisa. Ao fundo, uma imagem de satélite onde observa-se os avanços do desmatamento dentro da Unidade de Conservação. Destaca-se que estas Unidades de Trabalho foram submetidas à extração de madeira no ano de 2017 por meio do Plano de Manejo Florestal Comunitário da Associação de Moradores da Reserva Extrativista Chico Mendes em Xapuri.

Figura 06 – Mapa de localização das áreas de estudo.



Fonte: Autor, 2023.

Esse talvez seja o maior desafio dos gestores e moradores desta Unidade de Conservação, a manutenção da cobertura florestal. Localizada em uma região de forte pressão antrópica próximo a região de fronteira, proximidades da BR 317, facilidade de acesso a Unidade por via terrestre (ramais) associado a desvalorização de produtos extrativistas frente principalmente a pecuária, tudo isso tem forte impacto e reflete diretamente no novo cenário que se estabelece na área. As áreas de estudo são áreas averbadas para o Manejo Florestal Comunitário componente madeira, portanto, cada Unidade submetida a pesquisa está alocada em áreas contínuas de florestas.

3.2.2 Aquisição de dados

3.2.2.1 Imagem multiespectral

O uso de imagens multiespectrais tem se consolidado no campo do sensoriamento remoto com vastas opções de aplicação. Atualmente muitas dessas imagens estão disponíveis para *download* nas mais diferentes plataformas e de forma gratuita. Dentre as mais comuns

utilizadas para análises ambientais, pode-se destacar as imagens *Landsat* nas suas nove séries as quais disponibilizam informações com resolução espacial de até 30m, que possibilitam a realização de diferentes análises espaciais.

As imagens foram adquiridas através da plataforma <https://earthexplorer.usgs.gov> do *United States Geological Survey - USGS* (Levantamento Geológico dos Estados Unidos) por meio de da realização de cadastro de usuário. No presente estudo foram utilizadas 02 cenas com extensão de 185x185km para recobrimento da área de estudo a saber, LC09_L1TP_002067 e LC08_L1TP_003067. O Sensor da captação foi o *Operational Land Imager - OLI* (Operador de imagem terrestre) com data de registro de passagem de para a cena 00267 de 30/06/2022 a 01/07/2022 e para a cena 00367 de 13/06/2022 a 17/07/2022. A definição das cenas se deu por critérios de menos presença de nuvem e data de passagem mais recente.

O sensor OLI possui bandas espectrais para coleta de dados na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, além de uma banda pancromática (EMBRAPA, 2022). O quadro 02 da sequência, mostra as características técnicas para as 3 bandas espectrais das cenas utilizadas durante o trabalho.

Quadro 02 – Características das Bandas espectrais do satélite Landsat 8.

Bandas	Resolução espectral	Resolução espacial	Resolução radiometria
Banda3 (Verde)	0.525 - 0.600 μm	30m	12bits
Banda 4 (Vermelho)	0.630 - 0.680 μm	30m	12bits
Banda 5 (Infravermelho próximo)	0.845 - 0.885 μm	30m	12bits

* μm – micron

3.2.2.2 Dados de campo (inventário florestal)

Os dados de campo utilizados na pesquisa foram os dados de Inventários Florestal 100%, referente ao levantamento do Plano Operacional Anual da Associação de Moradores da Reserva Extrativista Chico Mendes em Xapuri – AMOPREX, referente ao ano de 2017. Os dados foram cedidos pela Cooperativa de Produtores de Produtores Florestais – COOPERFLORESTA, instituição representante da Associação e responsável pela execução dos inventários no local.

As planilhas com as informações de campo em formato Excel dos dados de Inventários Florestal 100%, apresentavam diversas informações referente ao censo florestal, entre estas informações podemos citar: Nome vernacular, número de identificação da placa, nome científico, circunferência a altura do peito – CAP, altura comercial, qualidade do fuste, estado de sanidade, Diâmetros a altura do peito, área basal, volume comercial, coordenadas de localização X e Y e categoria (PMFSC, 2017).

A primeira etapa foi eliminar as informações menos relevante da planilha, ou seja, desconsiderar as informações não utilizáveis para o estudo e que não interferiam no valor de estimativa de biomassa, utilizou-se, portanto, apenas as variáveis UT, n° da placa, nome vernacular, circunferência a altura do peito - CAP, altura, Diâmetro a altura do peito – DAP, área basal, volume comercial, coordenadas planas x e y, e biomassa.

3.2.3 Estimativa da biomassa florestal a partir de imagens multiespectrais

3.2.3.1 Pré-processamento das imagens orbitais

Como pré-processamento, as imagens obtidas do Satélite Landsat 8, passaram por calibração radiométrica (Jensen, 2008), de maneira a corrigir ruídos e outras imperfeições que podem interferir no resultado da análise. Para facilitar o processamento nesta fase optou-se por fazer um mosaico das duas cenas obtidas de maneira a abranger a área de estudo que posteriormente foi recortada a partir do perímetro da Unidade de Conservação de maneira a facilitar o processamento e as análises.

3.2.3.2 Modificação Número Digital para Reflectância

As imagens Lansat 8 são adquiridas de maneira gratuita por meio de *dowload* e são disponibilizadas com os números digitais correspondendo ao valor de cada pixel. Para a realização do presente estudo fez-se necessário a transformação dos números digitais para valores em reflectância. Esta etapa se fez necessária para poder gerar dois índices de vegetação utilizados no estudo: o NDVI e SAVI. O processo de transformação foi realizado com base nos parâmetros fornecidos pelos proprietários das imagens no caso o *United States Geological Survey – USGS* discriminados no documento *Using the USGS Landsat Level-1 Data Product* (Usando o produto de dados USGS Landsat nível 1) disponível na plataforma da USGS.

O arquivo de texto contendo os metadados das imagens “MTL” disponibilizado junto com as cenas adquiridas, fornecem os coeficientes de redimensionamento para ao processo de

transformação e considerando os respectivos parâmetros das bandas 3, 4 e 5 as quais foram manipuladas utilizando a ferramenta Calculadora Raster do software Qgis 3.22.1 como visualizado na equação abaixo.

$$\rho_{\lambda'} = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} / \sin(\theta_{SE})$$

onde:

$\rho_{\lambda'}$ = refletância planetária TOA, sem correção para ângulo solar. Observe que $\rho_{\lambda'}$ não contém uma correção para o ângulo do sol.

M_{ρ} = Fator de redimensionamento multiplicativo específico da banda dos metadados

(REFLECTANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda)

A_{ρ} = Fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados

(REFLECTANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda)

Q_{cal} = Quantizado e calibrado valores de pixel de produto padrão (DN)

\sin = Seno

θ_{SE} = Ângulo de elevação solar local. O ângulo de elevação do sol do centro da cena em graus é fornecido nos metadados (SUN_ELEVATION).

3.2.3.3 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI foi obtido com base no parâmetro *Landsat Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Landsat), o referido documento está disponível na Plataforma da USGS que fornece os parâmetros para o processo de criação desses índices. De acordo com o documento, o NDVI é usado para quantificar o verde da vegetação e é útil para entender a densidade da vegetação e avaliar as mudanças na saúde da planta. O NDVI é calculado como uma razão entre os valores de vermelho e infravermelho próximo (VERMOTE *et al.*, 2016).

Para a obtenção do NDVI foi utilizado a seguinte equação proposta por (VERMOTE *et al.*, 2016).

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

Onde: NIR = Infravermelho Próximo e R = Vermelho

No caso da imagem Landsat 8 NDVI = (Banda 5 – Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4)

Para o processo de criação do NDVI a expressão acima foi inserida na Calculadora *Raster* do Software Qgis 3.22.1 conforme indicado abaixo.

```
("LC09_L1TP_002067_T1_B5@1""LC09_L1TP_002067_T1_B4@1")/("LC09_L1TP_002067_20220630_T1_B5@1"+"LC09_L1TP_002067_T1_B4@1")
```

O processamento foi realizado para a cena 00267 e 003067 sendo as duas imagens obtidas a partir da plataforma Landsat 8. Essas imagens foram utilizadas para a obtenção do Índice NDVI e SAVI com cobertura para toda a área de estudo.

3.2.3.4 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – SAVI

O índice de Ajustado ao Solo – SAVI foi obtido igualmente ao índice anterior utilizando como referência o documento Landsat *Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Landsat). O SAVI derivado da refletância da superfície Landsat é calculado como uma relação entre os valores do vermelho (R) e Infravermelho próximo (NIR) com um fator de correção de brilho do solo (L) definido como 0,5 para acomodar a maioria dos tipos de cobertura do solo (VERMOTE *et al.*, 2016).

Para a obtenção do SAVI foi utilizado a seguinte equação também proposta por (VERMOTE *et al.*, 2016).

$$((NIR - R) / (NIR + R + L)) * (1 + L)$$

Onde: NIR = Infravermelho Próximo, R = Vermelho e L = (fator de correção 0,5)

Para Landsat 8, SAVI = ((Band 5 – Band 4) / (Band 5 + Band 4 + 0.5)) * (1.5).

3.2.3.5 Biomassa Florestal acima do solo a partir do inventário florestal

Para o cálculo da estimativa de biomassa utilizou-se a equação proposta por Melo (2017), a equação foi desenvolvida a partir de estudos sobre alometria de árvores e cálculos de biomassa baseada em coleta de dados de campo aplicada em áreas de pesquisa no estado do Acre.

$$AGB_{tree} = 0,064 \times D_{2,671}$$

Onde:

AGB = Biomassa seca acima do solo (Kg), D = Diâmetro a altura do peito (cm), a (0,064) e b (2,671) coeficientes do modelo.

O banco de dados organizado em planilha do Microsoft Excel considerou a biomassa seca acima do solo, a partir dos dados do DAP e utilizando a fórmula para a obtenção dos respectivos valores de biomassa estimados para cada árvore.

3.2.3.6 Matriz de Correlação entre valores GEDI e refletância das Bandas e Índices de Vegetação

Para a obtenção dos valores de biomassa GEDI e dos valores de refletância das Bandas 3, Banda 4 e Banda 5 e os Índices NDVI e SAVI foram utilizados os Softwares QGIs Versão 3.22 e o Rstudio Versão 4.2.1. Para uma melhor análise dos dados optou-se por fazer uma divisão da área de estudo levando em consideração as três tipologias florestais presentes na área de estudo, sendo Floresta Aberta com Bambu Densa (FABD), Floresta Aberta com Bambu (FAB) e Floresta Aberta com Palmeira Aluvial (FAPa).

Iniciou-se o processamento com o recorte dos pontos contendo os valores de biomassa do GEDI para área de interesse do estudo, no caso para os 37 polígonos referente às Unidades de Trabalho onde foi realizado o inventário florestal. Para esta operação utilizou a ferramenta *Recortar* do menu de ferramentas do Qgis. Para a obtenção dos valores de refletância utilizou-se o complemento *Point sampling tool* (Ferramenta de amostragem de pontos) também do software Qgis. Esse procedimento foi realizado primeiro para a região abrangida pela tipologia Floresta Aberta com Bambu Densa (FABD) e em seguida para as demais tipologias acima mencionadas.

Os testes estatísticos nesta etapa foram realizados utilizando uma matriz de correlação gerada no software Rstudio. Foi realizado uma análise multivariada entre os valores de biomassa GEDI, banda 3, banda 4, banda 5 e os índices de vegetação NDVI e SAVI, a fim de analisar a correlação existente entre os valores de biomassa e os respectivos valores de refletância extraídos das bandas espectrais e dos índices de vegetação para cada uma das três tipologias florestais analisadas.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Cálculo da Biomassa a partir do inventário florestal

As Unidades de Trabalho foram implantadas em 37 diferentes propriedades (Colocações) abrangendo 08 Seringais distintos seringal Nazaré, seringal Boa Vista, seringal Floresta, seringal Sibéria, seringal Albrácea, seringal Palmari, seringal Dois Irmãos e seringal Independência na região de Xapuri, totalizando aproximadamente 2.022,836 hectares de florestas inventariadas com medição de árvores potencialmente comerciais a partir do diâmetro a altura do peito - DAP \geq 30cm (PMFSC, 2017).

No total foram estimados os valores de biomassa de 23.096 árvores com DAP \geq 30 cm nas 37 Unidades de Trabalho. De acordo com o (PMFC, 2017) estas unidades foram inventariadas no ano de 2017 com a coleta de informações dendrométricas como a circunferência a altura do peito – CAP e altura comercial, além de outras informações como nome vernacular, categoria (corte, proibida de corte, rara, remanescente, porta sementes), classes de fuste e coordenadas de localização planas (X, Y) de cada árvore. Para cada uma destas unidades e seus respectivos inventários florestais foi aplicado a fórmula para o cálculo de biomassa proposta por Melo (2017) para a obtenção dos valores de biomassa. Esses valores seguem apresentado em Megagrama (Mg) e Megagramas por hectare (Mg/ha) conforme apresentado na tabela 01.

Tabela 01 - Biomassa total encontrada a partir de dados do inventário florestal.

Nome da UT	Área Total	Biomassa (Mg)	Biomassa Mg/ha
Amansa Bravo	40,671	2.279,97	56,06
As Minas	41,133	2.599,10	63,19
As Pedras I	40,589	2.876,53	70,87
Boa Vista II	60,42	2.876,53	47,61
Bom Futuro	40,116	2.172,27	54,15
Bom Jardim I	40,345	2.002,14	49,63
Bom Princípio I e III	61,371	3.271,96	53,31
Caucheiro	42,88	2.535,72	59,14
Centrinho I	80,904	4.420,60	54,64
Centro Virgem II	40,198	4.843,19	120,48
Costa Rica I	41,133	1.920,42	46,69
Deserto	41,851	3.971,34	94,89
Enroscado I	41,812	2.079,92	49,74
Esperança II	35,77	1.859,78	51,99
Estreito I	43,236	1.405,13	32,5
Fonte Nova I	40,192	1.930,73	48,04

Garimpo	42,907	2.879,68	67,11
Guarani	141,89	12.211,92	86,07
Gurgel II	40,5	4.388,58	108,36
Já Com Fome	42,238	2.695,31	63,81
Já Começa II	44,513	1.655,87	37,2
Jarinal I	40,093	1.426,68	35,58
Limeira II	40,182	2.749,27	68,42
Maloca II-III	63,166	4.675,29	74,02
Maloquinha I_II	40,51	3.456,05	85,31
Monte Verde	40,675	3.146,38	77,35
Monte Videl I	40,011	2.025,45	50,62
Morada Nova	16,834	1.095,45	65,07
Paxiúba I	41,392	1.957,32	47,29
Porongaba	61,25	3.967,09	64,77
República	41,693	1.939,51	46,52
Santa Maria	18,11	1.426,68	78,78
São Pedro II	40,08	2.625,64	65,51
Sussego I	60,257	4.423,86	73,42
Tracoá III-IV	82,667	4.234,36	51,22
União	60,885	3.992,79	65,58
Uruqueu I	40,378	2.464,30	61,03
TOTAL	1772,85	112.482,81	2.325,98

Fonte: Autor 2023.

A tabela acima mostra os valores de biomassa encontrados em cada uma das Unidades analisadas. Destaca-se que os valores de biomassa encontrados são referentes à soma da biomassa de todos os indivíduos inventariados em cada Unidade levando em consideração as métricas comerciais, ou seja, a medidas acima de 30 cm de DAP e altura comercial das árvores. Isso justifica os baixos valores de biomassa encontrados nessa estimativa. Ressalta-se que o uso dessa informação de campo fez-se necessário uma vez que foi a única informação de campo encontrada para efeito de comparação com as demais estimativas, isto pelo fato de não termos acesso aos dados de inventário contínuo da área.

Os valores de biomassa encontrados nesta análise chegaram a 4,87 Mg/indivíduo valores bem próximos ao encontrado por Romero et tal. (2020) em seu estudo sobre quantificação da biomassa e estoques de carbono em áreas submetidas ao manejo florestal no estado do Acre, com avaliação de biomassa a partir do fuste comercial das árvores, encontrou valor de 4,33 Mg/indivíduo.

A Tabela 02 traz os resultados por Seringal, ou seja, uma análise do quantitativo considerando as áreas mapeadas considerando toda a área do Seringal onde encontra-se localizada a propriedade e a unidade de trabalho estudada.

Tabela 02 - Biomassa total encontrada a partir de dados do inventário florestal por cada Seringal.

Seringal	Área Total (ha)	Biomassa (Mg)
Independência	41,13	1.920,42
Sibéria	41,81	2.079,92
Floresta	101,88	6.728,01
Albrácea	122,56	8.625,87
Dois Irmãos	181,75	20.006,82
Nazaré	223,16	17.905,77
Boa Vista	288,63	32.945,49
Palmari	366,60	22.270,51

Fonte: Autor 2023.

Os valores na sua maioria foram obtidos proporcionalmente ao quantitativo de área, ou seja, quanto maior a dimensão da área, maior o valor de biomassa obtido, com uma ressalva para o Seringal Palmari que apresentou valores divergentes do padrão estabelecido. O Seringal Palmari abriga a maior área em hectare dentre os outros seringais, porém seu valor de biomassa encontrado ficou abaixo do Seringal Boa Vista, a segunda maior área em hectare analisada, porém com maior valor de biomassa estimado. Isso pode ser explicado talvez pelo diferente porte das árvores mensuradas em cada uma destas áreas, considerando as diferentes tipologias a qual estas áreas estão inseridas.

3.3.2 Correlação entre Biomassa GEDI e Refletância do Índice de Vegetação

A utilização da matriz de correlação visa determinar o grau de associação entre variáveis (WATZLAWICK, 2003). A matriz de correlação realizada entre as variáveis biomassa do GEDI e as respostas espectrais das 03 bandas do sensor OLI do satélite Landsat 8 e os índices de vegetação gerados a partir destas imagens, possibilitou a análise destas variáveis.

Este teste estatístico foi realizado de forma seccionada considerando as diferentes tipologias florestais existentes na área de estudo. Iniciou-se a análise pela região de predominância de Floresta aberta com Bumbo Densa – FABD conforme Tabela 03 abaixo. De maneira geral observou-se a ausência de correlação entre as variáveis analisadas para esta

tipologia florestal. Como podemos observar na matriz de correlação Tabela 03), não há existência de correlação significante entre as variáveis biomassa e as bandas espectrais bem como os índices de vegetação.

Tabela 03 - Matriz de correlação para a região Floresta Aberta com Bambu Densa – FABD (Landsat 8).

	<i>Biom</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>	<i>NDVI</i>	<i>SAVI</i>
Biom	1					
B3	0,094071	1				
B4	-0,027	0,525349	1			
B5	-0,00556	0,649113	0,983362	1		
NDVI	-0,02647	0,513863	0,99843	0,980907	1	
SAVI	-0,027	0,525349	1	0,983362	0,9984	1
						3

Fonte: Autor, 2023.

As correlações mais relevantes encontram-se entre os valores das respostas espectrais das bandas B4 e B5 (vermelho e infravermelho) com os índices (NDVI, SAVI), tornando assim a nossa hipótese negativa uma vez que esperava-se encontrar um resultado positivo no tocante a existência de alguma correlação entre essas variáveis com a biomassa.

Resultado parecido foi obtido na região de cobertura da tipologia Floresta Aberta com Bambu – FAB visualizado na Tabela 04 e para a região para a região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa apresentados Na Tabela 05.

Tabela 04 – Matriz de correlação para a região Floresta Aberta com Bambu – FAB e Bandas espectrais dos satélites Landsat 8.

	<i>Biom</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>	<i>NDVI</i>	<i>SAVI</i>
Biom	1					
B3	-0,07747	1				
B4	0,110481	-0,00877	1			
B5	0,015374	-0,06531	-0,0324	1		
NDVI	0,011442	-0,07598	-0,02221	0,958679	1	

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 05 - Matriz de correlação para a região Floresta Aberta com Palmeira Aluvial - FAPA e Bandas espectrais dos satélites Landsat 8.

	Biom	B3	B4	B5	NDVI	SAVI
Biom	1					
B3	-0,065	1				
B4	-0,065	1	1			
B5	-0,131	0,5821	0,5821	1		
NDVI	-0,144	0,3877	0,3877	0,9692	1	
SAVI	-0,149	0,4019	0,4019	0,9727	0,9989	1

Fonte: Autor, 2023.

No teste aplicado a essas regiões florestais também não foi encontrado correlação significante entre as variáveis estudadas. Semelhante a análise anterior as correlações mais relevantes novamente encontraram-se entre os valores das respostas espectrais da banda B5 (infravermelho) com os índices (NDVI, SAVI).

O instrumento GEDI gera dados a partir do escaneamento laser que penetra a superfície da floresta podendo chegar até o solo. Os dados de respostas obtidos por meio dessas waveforms são responsáveis pela geração de várias informações sobre a estrutura da floresta inclusive estimativas de biomassa em pontos distintos footprint geolocalizados. No que se refere as imagens multiespectrais as respostas são relacionadas aos diferentes níveis refletância da superfície de copa da floresta, formando imagem *wall to wall* de cobertura continua. Um instrumento e um sensor que geram dados orbitais diferentes, esse fator pode estar relacionado com a ausência de correlação entre os dados correlacionados nas tabelas acima.

A partir da constatação dos valores encontrados observou-se a inviabilidade em manter a metodologia inicial para as estimativas de biomassa a partir da refletância das imagens orbitais. Nesse sentido a estratégia adotada foi a mudança na metodologia para o cálculo das estimativas. A metodologia utilizada a partir de então foi a interpolação para modelagem das estimativas de biomassa a partir dos valores de biomassa disponibilizados pelo instrumento GEDI que será discutido no capítulo 5. Igualmente a análise anterior e objetivando identificar possíveis alterações nos valores dos índices da estimativa de biomassa por interpolação, optou-se por analisar os dados também obedecendo os critérios da separação por tipologia florestal, ou seja, as estimativas foram calculadas de acordo com as características florestais de cada região onde estão alocadas as áreas de estudo.

3.4 CONCLUSÃO

As imagens multiespectrais como já relatado anteriormente são e ainda continuam muito utilizadas para estudos sobre a cobertura florestal. É a partir delas que é possível a realização do monitoramento do desmatamento e acompanhamento dessas mudanças ano a ano. O campo tecnológico tem evoluído bastante o que permite o acesso a outras ferramentas tecnológicas que se somam ao uso de imagens multiespectral tornando possível melhorar os resultados a partir de informações geradas de maneira remota.

A associação de mais de um instrumento como o Lidar com o escaneamento em nuvem de pontos, e agora com o uso dos VANTs que geram imagens atualizadas e em boa resolução espacial já são realidade, são avanços que se somam na colaboração de pesquisas relacionadas ao monitoramento de cobertura florestal. Este trabalho propôs exatamente testar o uso de dados obtidos do instrumento GEDI associado a imagens multiespectrais Landsat no intuito de obter o resultado da biomassa florestal e do carbono numa área de floresta nativa na Reserva Extrativista Chico Mendes no Acre.

Como resultado conclui-se que há a possibilidade no uso de ambos os dados, no entanto, como resultados em relação os objetivos propostos no estudo, não foram obtidos de forma satisfatória, não foi possível alcançar de acordo com a metodologia utilizada os resultados de biomassa e carbono uma vez que os resultados de correlação entre os dados do instrumento GEDI e das bandas multiespectrais e índices de vegetação não foram expressivamente favoráveis.

A esse respeito algumas hipóteses são levantadas sob esses resultados obtidos, uma delas pode estar relacionada aos índices de refletância das imagens Lansat 8 para região estudada, pode ter variação para outras regiões. Os dados GEDI são recentes, os dados utilizados foram pontos geolocalizados com informação de biomassa agregado em cada ponto e associado ao pixel das imagens os que gerou as correlações baixas.

É evidente que são necessários mais estudos principalmente com os dados do GEDI, uma das formas propícias seria a utilização dos dados mais atualizados como o raster de biomassa, no entanto há limitação é a escala uma vez que esses dados estão disponíveis, mas em escala global, por tanto se faz necessário mais estudos para avaliação e utilização desses dados numa escala maior, ou seja, áreas menores que requer nível de detalhamento melhor como é o caso das áreas submetidas por esta pesquisa.

CAPÍTULO 4

4.0 ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO FLORESTAL ACIMA DO SOLO A PARTIR DE DADOS GEDI POR INTERPOLAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

As preocupações com os processos de degradação florestal sobretudo os ocasionados pela ação antrópica, já não estão apenas relacionadas às taxas de desmatamento florestal, as questões agora vão muito mais além, questões científicas e políticas relacionadas com o estado atual e futuro do ciclo do carbono, da água da Terra e do clima agora também estão em discussão (DUBAYAH, 2020).

Com o avanço de novas tecnologias novas possibilidades e técnicas de inventários florestais a partir de sensores orbitais começam a surgir. O sistema *Lighth Detection and Ranging* - LIDAR, por exemplo, tecnologia baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de *Radio Detecting and Raging* - RADAR, é um exemplo dessas tecnologias, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LIDAR utiliza pulsos laser. (GIONGO et al. 2010).

Recentemente a ciência ganha mais uma tecnologia de geração de dados orbitais, com a utilização do recente *Ecosystem Dynamics Investigation* - GEDI, projetado pela NASA, esse instrumento coleta dados sobre a estrutura e a extensão das florestas em formato tridimensional (BRASIL, 2019). O GEDI possui dados em diferentes níveis de processamento, fornecendo informações sobre a estrutura florestal e biomassa florestal acima do solo.

GEDI opera de maneira remota e fornece informações que contribuem no monitoramento e outras ações que visem a conservação das florestas. Dentre as informações geradas a partir do instrumento GEDI estão os de biomassa e carbono referente às florestas de todo o globo, seu uso é aberto o que facilita o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao monitoramento florestal. As informações geradas pelo instrumento podem ser utilizadas para estimar os estoques de biomassa e carbono com maior precisão, logo, possibilita o desenvolvimento de pesquisas dessa natureza na região sul ocidental da Amazônia.

A partir da coleta dos primeiros dados GEDI, foram gerados um conjunto de outros dados a níveis mais avançados. O arquivo GEDI utilizado na pesquisa refere-se a malha de pontos com valores de biomassa associados e com geolocalização de maneira a cobrir toda a área de estudo. Como a malha de pontos GEDI é estruturada obedecendo uma distância entre

os pontos, faz-se necessário o uso de imagem continua para a realização das estimativas da biomassa e posteriormente do carbono florestal acumulado.

Nessa perspectiva, a presente pesquisa propõe utilizar os dados disponíveis do instrumento GEDI, para estimar a biomassa e os estoques de carbono florestal acima do solo com a utilização da técnica de interpolação como forma de obtenção das estimativas por extração dos valores conhecidos GEDI para toda extensão territorial das áreas de estudo.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Aquisição de dados GEDI

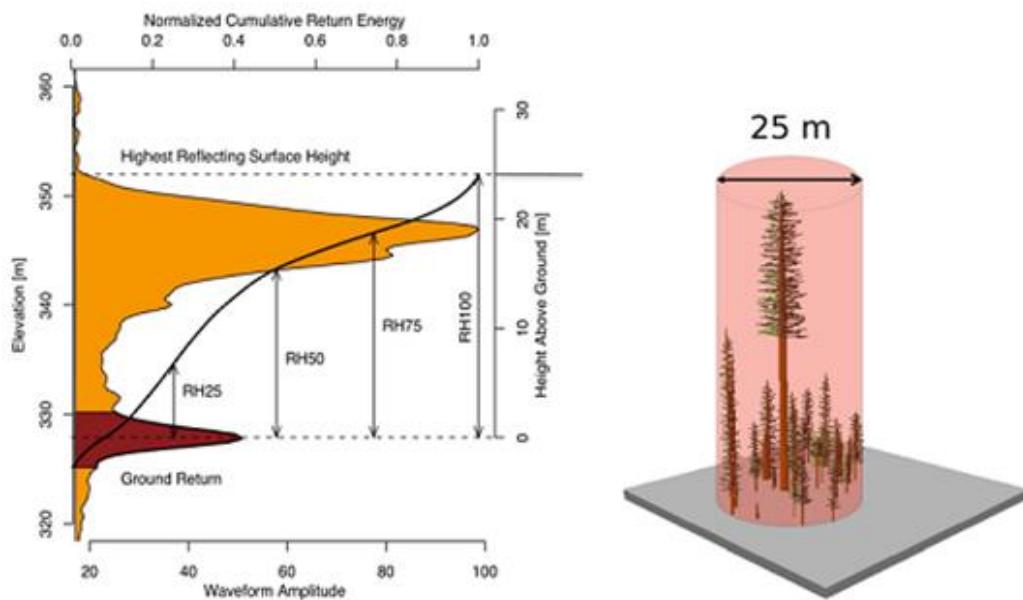
Os dados GEDI estão disponíveis para *download* para usuários cadastrados na plataforma *Earth Data* da Agência espacial Americana NASA, disponível pelo endereço eletrônico https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=2017. Esses dados agregam biomassa resultante de observações realizadas entre o período de 17 de abril de 2019 a 13 de abril de 2022. Para o acesso a esses arquivos foi utilizado o *software* “R” versão 4.2.3, que permite aos usuários realizarem análises de dados em código *Python*. Tutoriais com os *scripts* de código *Python* foram utilizados e encontram-se disponível, no GitHub [ornl/daac_gedi_tutorial](https://github.com/ornl/daac_gedi_tutorial).

O GEDI disponibiliza dados em diferentes níveis de aquisição, neste trabalho optou-se em trabalhar com os dados de nível 4 ou L4A. Os dados de nível 4 são os dados mais recentes e que são disponibilizados já com algum nível de processamento com informações relacionadas a biomassa (GEDI, 2020). A resolução espacial 25 m, foi uma das principais razões para escolha dos dados L4A, uma vez que considerando a escala espacial da área de estudo isto possibilitará a mensuração mais detalhada do estoque de biomassa e carbono. Vale destacar que o GEDI também disponibiliza métricas de AGBD em formato *Raster* em uma escala global de 1x1km.

Os dados L4A são referentes a Densidade de Biomassa Acima do Solo em Grade - AGBD em Mg/ha e agregam estimativas de biomassa média acima do solo dentro de cada ponto de laser geolocalizado (DUBAYAH *et al.* 2022). Estes dados são derivados de modelos paramétricos que relacionam métricas de altura relativa de forma de onda utilizando outro nível de dados GEDI, o nível 2A (L2A) (DUBAYAH *et al.* 2022).

Destaca-se que cada um dos pontos geolocalizados, abrange uma área com raio de 25m de diâmetro conforme visualizado na Figura 07, onde valores de biomassa são registrados em Mg/ha (magagrama por hectare). Portanto faz-se necessário o uso de imagem *wall to wall* para que se consiga obter as informações de biomassa para toda a extensão da área estudada.

Figura 07 - Esquema ilustrativo da área de cobertura espacial de cada ponto.



Fonte: Adaptado de GEDI 2022.

O esquema acima mostra como são calculados os valores captados pelo GEDI, que a partir da energia refletida podem gerar várias informações úteis sendo uma delas os índices de biomassa florestal. Acerca disso J Smith destaca que

As formas de onda LiDAR quantificam a distribuição vertical da vegetação registrando a quantidade de energia do laser refletida pelo material vegetal (caules, galhos e folhas) em diferentes alturas acima do solo. A partir dessas formas de onda, quatro tipos de informações de estrutura podem ser extraídos: topografia de superfície, métrica de altura do dossel, métrica de cobertura do dossel e métrica de estrutura vertical. (SMITH, 2022).

Para o recorte espacial de referência foi utilizado o perímetro oficial da área de estudo acessado do sítio eletrônico do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBIO. Em seguida, os dados foram então convertidos para o formato *shapefile* para serem manipulados no *software* livre de geoprocessamento QGIS.

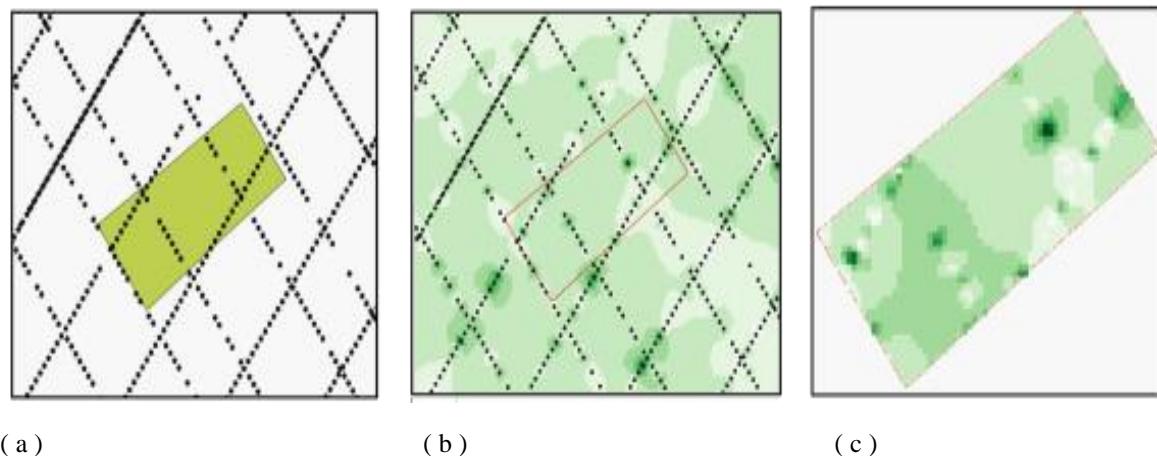
4.2.2 Análise de dados

4.2.2.1 Interpolação dos dados

Inicialmente foram recortados todos os pontos GEDI que recobrem as 37 Unidades de Trabalho. Esse recorte foi realizado em uma área ligeiramente maior do que a Unidade de Trabalho, objetivando obter-se um melhor resultado no processo de interpolação, essas etapas podem ser visualizadas na sequência das imagens ilustrada pela Figura 08.

Para esse processamento utilizou-se o software QGis versão 3.22.1. Após recortado todos os pontos procederam-se com o processo de interpolação utilizando o método Ponderação pelo Inverso da Distância – IDW, com saída do raster com resolução espacial de cerca de 22 metros. Após criada a primeira versão do raster, procedeu-se com o recorte do raster com o perímetro de cada Unidade de Trabalho, para essa ação utilizou-se o comando *extrair>recortar raster pela camada de máscara* do menu de ferramentas do referido software para posterior quantificação dos valores de biomassa estimada.

Figura 08 - Sequência da rasterização utilizada para obtenção dos valores de biomassa em uma das Unidades de Trabalho analisada.



(a)

(b)

(c)

- (a) Pontos GEDI sobrepostos a área de abrangência da Unidade de Trabalho Centrinho I ;
- (b) Interpolação da área da Unidade de Trabalho e do entorno; (c) Raster de saída com distribuição da biomassa para a área da Unidade de Trabalho.

4.2.2.2 A Malha de pontos GEDI

Os dados GEDI baixados resultou em um arquivo no formato *shapefile* com aproximadamente 635.526 pontos geolocalizados dentro da Unidade de Conservação, cada um

desses pontos contém um valor associado de biomassa acima do solo, valor este utilizado para a estimativas realizadas para todos as 37 Unidades de Trabalho analisadas. Para facilitar o processamento foi realizado o recorte espacial desses pontos para as áreas de interesse à pesquisa, ou seja, para as 37 Unidades de Trabalho que passaram pela análise da estimativa de biomassa. Após o recorte foram realizadas as devidas modificações no sistema de referência dos pontos para melhorar a precisão dos mesmos sobre a área de estudo. Optou-se por trabalhar com todos os dados no Sistema de Referência de Coordenadas UTM - Universal Transverse Mercator Zona 19S Datum SIRGAS 2000.

Também se fez necessário excluir a ocorrência de pontos com valores de biomassa nulos ou com valor igual a zero, uma vez que todas as Unidades de Trabalho analisadas se encontram alocadas em áreas de floresta por se tratar de áreas de manejo florestal. Essas áreas sem informação podem ser resultado de falhas ocasionadas durante o processo de escaneamento da área pelo laser GEDI. Toda a análise dos dados GEDI foi realizada com o uso do software Qgis versão 3.22.1.

4.2.2.3 Cálculo do carbono

Para Higuchi et al. (2004) a estimativa dos estoques de carbono pode ser obtida através do produto da biomassa florestal por meio da concentração de carbono presente. Para o autor a concentração de carbono na vegetação está em torno de 48% de sua biomassa seca, valor este dentro dos limites de concentração de carbono para florestas tropicais que é de cerca de 46 a 52%.

Para Ferreira et tal (2016) para que se consiga estimar o estoque de carbono é necessário o uso do fator de conversão que considera que do valor da biomassa fresca de uma árvore, 60% desta refere-se ao peso seco e deste valor 48% referem-se ao teor de carbono presente o que se aproxima dos valores mencionados pelo autor acima.

Portanto, conhecido os valores de biomassa acima do solo, o cálculo do carbono estocado para as Unidades amostrais foi realizado utilizando a planilha contendo os valores de biomassa sendo gerado uma nova matriz tipo raster para a obtenção dos valores de carbono. Neste sentido o cálculo para a estimativa do carbono foi realizado inicialmente com o cálculo de biomassa de acordo com Ferreira (2016) em considera a equação abaixo:

$$BS = AGB * 0,60$$

Sendo:

BS= Biomassa seca,

AGB= Valor de biomassa GEDI e

0,60 = percentual de biomassa seca.

A partir das estimativas de biomassa seca foi possível realizar a estimativa do carbono a partir da equação:

$$Carb = BS * 0,48$$

Sendo:

Carb = Carbono,

BS = Biomassa Seca e

0,48 = Teor de Carbono.

4.3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

4.3.1 Biomassa GEDI pelo método de interpolação para diferentes substratos florestais

Neste capítulo, também considerou-se a área total das 37 Unidades de Trabalho, ou seja aproximadamente 1.857,68 hectares de floresta onde utilizou-se o método de interpolação para obtenção dos respectivos valores estimados de biomassa. Para as análises biomassa considerou-se também os diferentes substratos florestais Floresta Aberta com Bambu Densa - FABD, Floresta Aberta com Bambu - FAB e Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa.

4.3.2 Região Floresta Aberta com Bambu Densa - FABD

Considerando a área de abrangência de Floresta Aberta com Bambu Densa, 03 Unidades de Trabalho foram analisadas sendo: UT Caucheiro, UT Esperança II e UT Porongaba. Em termos de dimensão, as três Unidades de Trabalho apresentaram em média cerca de 42 ha cada. No geral foram obtidos aproximadamente 857.135,69 Mg de biomassa acima do solo, totalizando uma média de 6.126,77 Mg por hectare. A Tabela 09 traz os respectivos valores estimados com a dimensão da Unidade de Trabalho, a estimativa de biomassa encontrada pelos dados do inventário florestal como comparativo e os valores da biomassa estimados do GEDI estimados por interpolação.

Tabela 09 - Estimativas de biomassa pelo método de interpolação para as três Unidade de Trabalho na região de FABD.

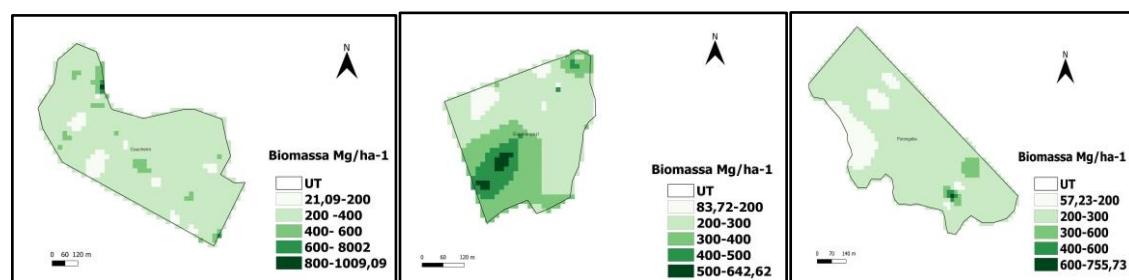
<i>Nome da UT</i>	<i>Área Total</i>	<i>Estimativa biomassa Mg (Inventário)</i>	<i>Estimativa biomassa Mg (GEDI)</i>
<i>Caucheiro</i>	42,88	2.535,72	293.077,20
<i>Esperança II</i>	35,77	1.859,78	244.400,78
<i>Porongaba</i>	61,25	3.967,09	319.657,71
Total	139,9	8.362,59	857.135,69
Média/ha	46,63	59,78	6.126,77

Fonte: Autor 2023.

Destaca-se que a alta diferença entre os valores estimados pelo inventário florestal com os valores encontrado pela estimativa GEDI, é explicado em função do inventário florestal tratar-se de métricas apenas de árvores comerciais, em que a altura uma das métricas coletadas em campo é estimada apenas para o aproveitamento comercial dos indivíduos mapeados, desconsiderando toda a parte superior da copa árvores, o que tem provocado uma diferença significativa entre as duas variáveis.

A figura 09 mostra a distribuição da biomassa encontrada com variação dos valores dentro de cada Unidade de Trabalho, sendo possível a identificação dos locais de maior e menor intensidade de biomassa acima do solo por meio das métricas de rastreio do captadas pelo GEDI e convertidas em imagens raster para cada Unidade de Trabalho analisada.

Figura 09 - Mapas de biomassa GEDI estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu Densa – FABD.



Fonte: Autor 2023.

Para as três áreas observou-se uma variação entre $21,09 \text{ Mgh}^{-1}$ chegando a $1009,09 \text{ Mgh}^{-1}$ valores estes obtidos pelos pontos conhecidos GEDI interpolados para toda a superfície de cobertura das áreas. Observou-se também que nas três Unidades de Trabalho há predominância dos valores de biomassa entre 200 a 400 Mgh^{-1} onde os valores mais altos em

proporções menores e pontuais o que pode ter relação com a característica desta tipologia florestal onde há predominância forte da vegetação bambu.

4.3.3 Região Floresta Aberta com Bambu - FAB

Essa tipologia florestal é a maior em extensão, e por esta razão agrupa uma maior quantidade de UT's, ou seja, 23 das 37 Unidades de Trabalho estudadas totalizando aproximadamente 1.229,75 hectares de florestas. Nesta Região foram estimados aproximadamente 6.444.451,50 Mg considerando todas as 23 Unidades de Trabalho. A média por hectare ficou em cerca de 5.240,47 Mg/h⁻¹. A tabela 10 traz os valores sistematizados resultado das respectivas análises.

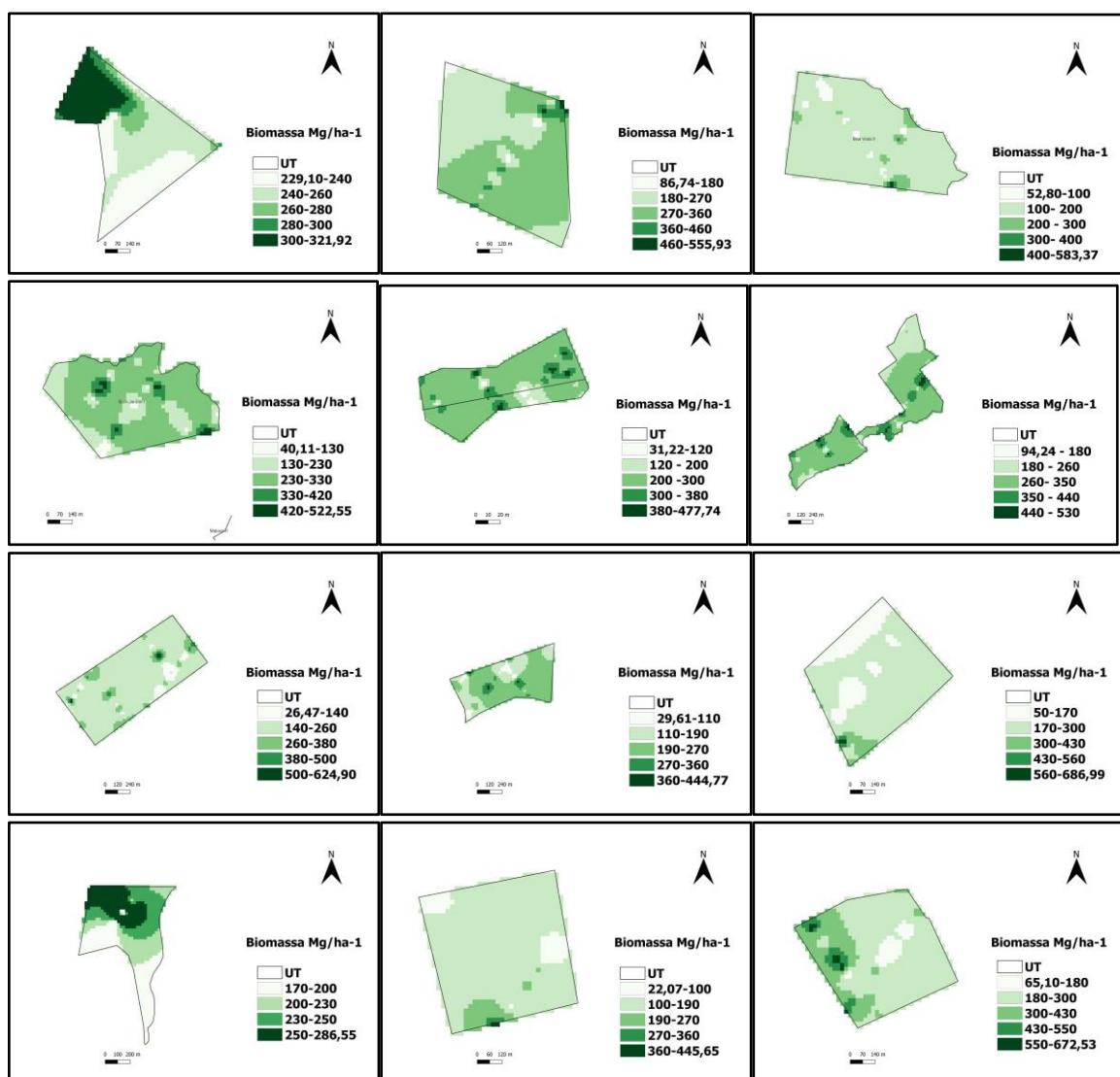
Tabela 10 - Estimativas de biomassa GEDI para as vinte e três Unidades de Trabalho na região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.

<i>Nome da UT</i>	<i>Área Total</i>	<i>Estimativa biomassa Total (Mg) Inventário florestal</i>	<i>Estimativa biomassa Total (Mg) GEDI</i>
Amansa Bravo	40,67	2.279,97	255.645,26
As Minas	41,13	2.599,10	253.975,90
Boa Vista II	60,42	2.876,53	225.358,36
Bom Jardim I	40,35	2.002,14	229.574,96
Bom Princípio I e III	61,37	3.271,96	343.779,38
Centrinho I	80,9	4.420,60	397.494,44
Centro Virgem II	40,2	4.843,19	182.965,55
Costa Rica I	41,13	1.920,42	188.277,28
Deserto	41,85	3.971,34	218.269,62
Enroscado I	41,81	2.079,92	216.808,21
Estreito I	43,24	1.405,13	145.434,78
Garimpo	42,91	2.879,68	265.143,79
Guarani	141,89	12.211,92	1.007.982,26
Gurgel II	40,5	4.388,58	247.156,29
Já Com Fome	42,24	2.695,31	244.140,40
Limeira II	40,18	2.749,27	144.930,44
Maloca II-III	63,17	4.675,29	244.140,40
Maloquinha I_II	40,51	3.456,05	270.645,49
Paxiúba I	41,39	1.957,32	152.464,04
São Pedro II	40,08	2.625,64	157.311,39
Sossego I	60,26	4.423,86	352.730,32
Tracoá III-IV	82,67	4.234,36	408.657,76
União	60,89	3.992,79	291.565,18
Total	1.229,75	81.960,37	6.444.451,50
Média/ha	53,47	66,65	5.240,47

Fonte: Autor, 2023.

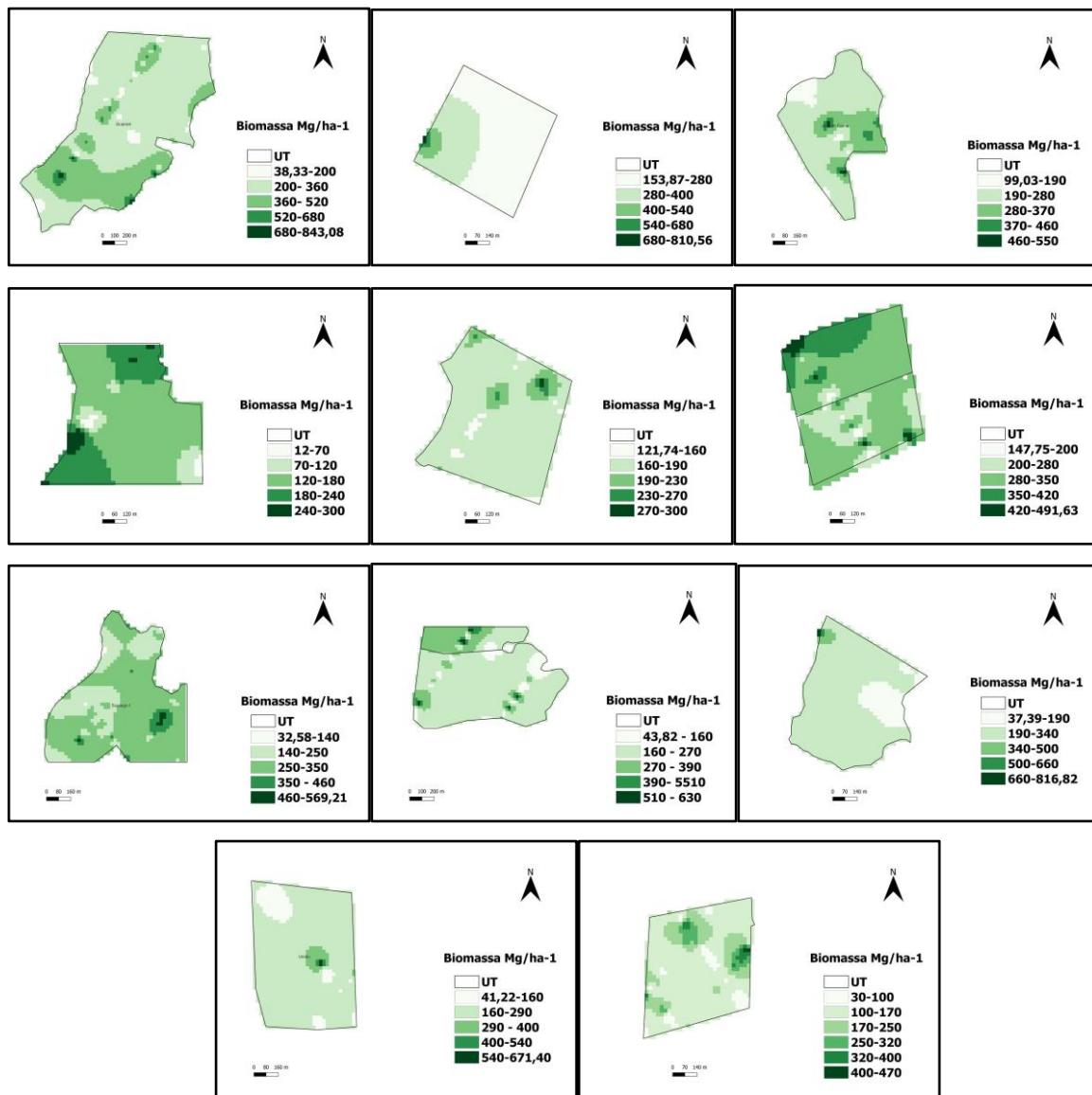
Os maiores valores de biomassa encontrados para esta região ficaram em torno de 600 a 800 Mg/h⁻¹. Esses valores de biomassa assim como na tipologia florestal anterior, não foram identificados em grandes proporções quando analisada sua distribuição em cada Unidade de Trabalho, os maiores valores podem ser visualizados por meio de pequenas manchas esparsas representadas na cor verde escuro. A espacialização da biomassa nas áreas analisadas mostrou que a maior proporção de biomassa encontrada foi de 100 a 300 Mg/h⁻¹ conforme visualizado nas figuras 10A e 10B.

Figura 10A - Mostra 12 mapas de biomassa estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 10B - Mostra a continuação com mais 11 mapas de biomassa estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.



Fonte: Autor 2023

4.3.4 Região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPA

Nesta região fisiográfica foram analisadas 11 Unidades de Trabalho totalizando 403,20 hectares de florestas. Para esta região foram estimados aproximadamente 1.895.501,19 Mg considerando todas as 11 Unidades de Trabalho. A média das unidades amostrais apresentou cerca de 4.701,14 Mg/h⁻¹. Esta região apresenta diferença nas características da vegetação como a presença de palmeiras em maior intensidade, essas diferenças podem estar associadas ao tipo de solo predominante nessa região no caso solos do tipo Gleissolo Háplico e Neossolo

Flúvico. São áreas localizadas nas proximidades das margens do rio Acre, algumas das Unidades localiza-se próximo a margem do manancial.

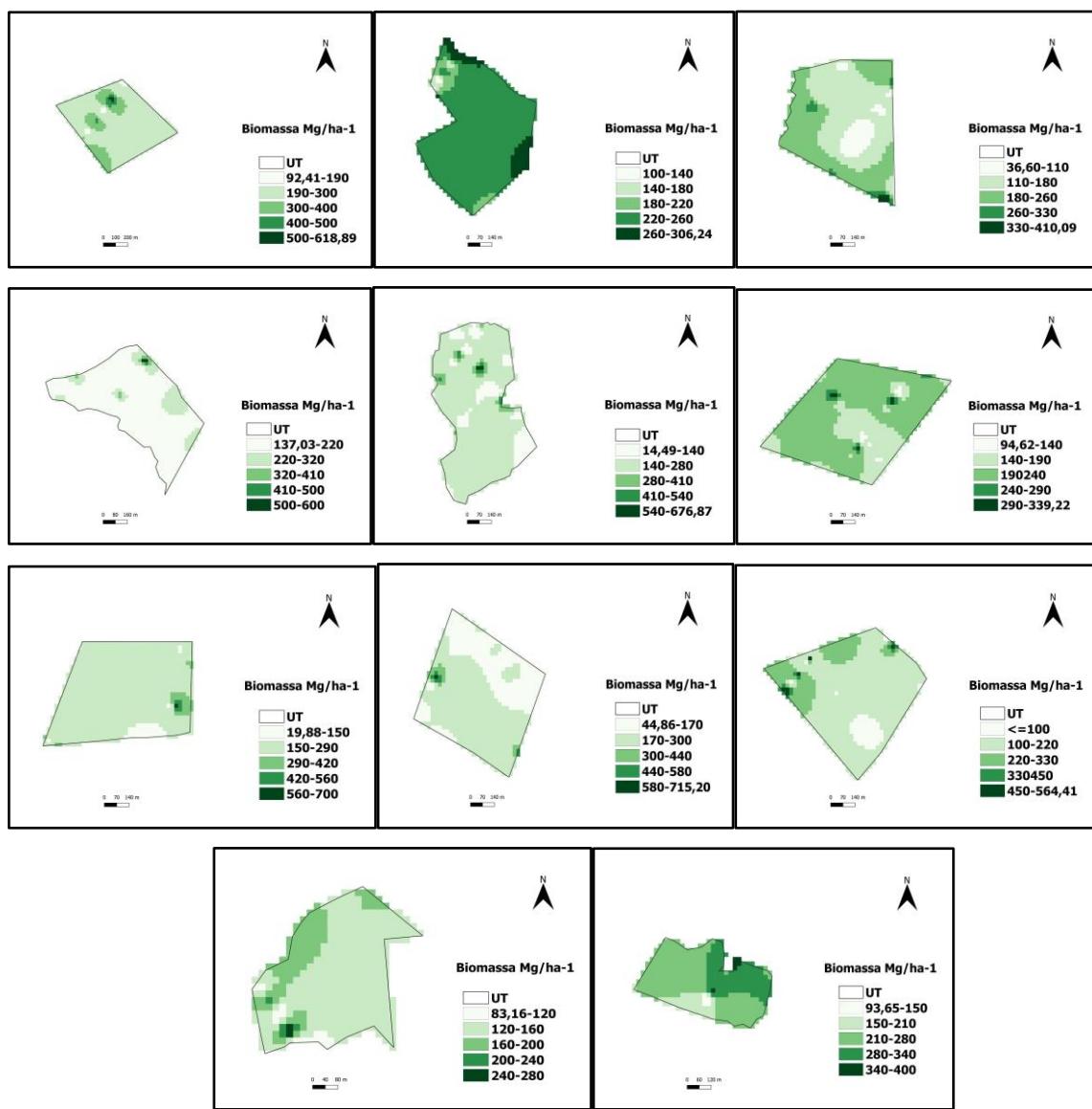
Para esta região os maiores valores de biomassa foram encontrados nos valores de 500 a 700 Mg/h⁻¹ valor ligeiramente abaixo dos valores da região anteriormente analisada. Essa pequena diferença pode estar associada às características florestais dessa região. Similar às outras duas regiões analisadas, houve a predominância dos valores entre 100 a 300 Mg/h⁻¹ ocupando a maior área de extensão das Unidades o que significa que a maior quantidade de biomassa encontrada, variou entre esses valores, enquanto que o maior e menor valor de biomassa foram encontradas em menor proporção. A tabela 11 traz os totais sistematizados de biomassa estimados e na sequência, a Figura 11 mostra a distribuição espacial desses valores.

Tabela 11 - Estimativas de biomassa GEDI para as 11 Unidades de Trabalho na região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa.

<i>Nome da UT</i>	<i>Área Total</i>	<i>Estimativa biomassa Total (mg) Inventário florestal</i>	<i>Estimativa biomassa Total (mg) GEDI</i>
Jarinal I	40,09	1.426,68	254.189,13
As Pedras I	40,59	2.876,53	225.358,36
Bom Futuro	40,12	2.172,27	155.030,36
Monte Verde	40,68	3.146,38	193.930,10
Monte Videl I	40,01	2.025,45	167.262,51
Já Começa II	44,51	1.655,87	195.321,55
Fonte Nova I	40,19	1.930,73	186.327,90
Uruqueu I	40,38	2.464,30	174.016,44
República	41,69	1.939,51	173.815,86
Morada Nova	16,83	1.095,45	61.507,46
Santa Maria	18,11	1.426,68	108.741,52
<i>Totais</i>	<i>403,2</i>	<i>22.159,85</i>	<i>1.895.501,19</i>
<i>Média/ha</i>	<i>36,65</i>	<i>54,96</i>	<i>4.701,10</i>

Fonte: Autor, 2023.

Figura 11 - Mostra os 11 mapas de biomassa estimados dentro da região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa.



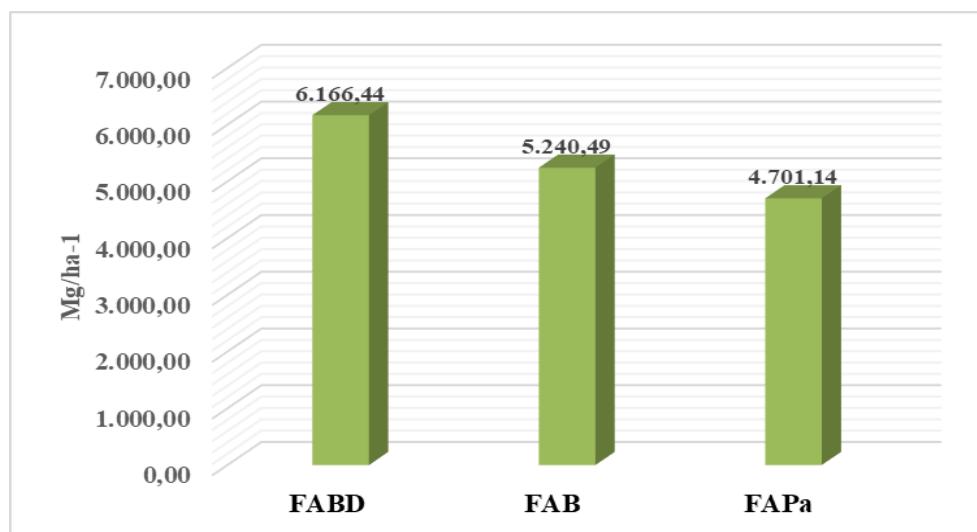
Fonte: Autor 2023

Analizando mais detalhadamente constatou-se uma pequena diferença entre os valores médios de biomassa por hectare quando comparados em considerando ao recorte pelas três tipologias florestais analisadas. O valor de biomassa por hectare na região de Floresta Aberta com Bambu Densa – FABD apresentou-se maior cerca de 15,01% em relação ao valor encontrado na região de Floresta Aberta com Bambu-FAB e cerca de 23,75% em relação a região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial-FAPa. Essa diferença pode ser explicada em

função da própria estrutura de cada tipologia florestal resultado do escaneamento em 3D do GEDI.

A Figura 12, traz os valores encontrados de biomassa para as três tipologias florestais e mostra a diferença entre os valores que variou entre $4.701,14 \text{ Mg/h}^{-1}$ a $6.166,44 \text{ Mg/h}^{-1}$. Observou-se uma pequena variação nos valores de biomassa no resultado do quantitativo estimado, o que pode indicar possível influência das características florestais de cada região.

Figura 12 - Valores de biomassa/ha nas três tipologias analisadas.



Fonte, Autor, 2023.

Comparando os resultados desta pesquisa em relação a outros estudos, destaca-se o trabalho de Rocha et al. (2023) este estudo foi realizado na Unidade de Conservação Reserva extrativista Chico Mendes utilizando uma metodologia por sistema remoto para a mensuração da biomassa acima do solo, utilizando a tecnologia de nuvem de pontos levantados pelo sistema LiDAR UAV- GatorEye. Neste estudo foram encontrados aproximadamente 16.42 Mg ha^{-1} em uma área de 100 hectares. O valor relativamente menor que o encontrado pelas estimativas GEDI que foram em média geral de $5.187,74 \text{ Mg ha}^{-1}$ em uma área total de 1.857,68 hectares.

Os dois modelos de mensuração testados são recentes, o sistema lidar UAV- GatorEye ainda se encontra ainda em fase de testes, isso implica dizer que pode haver ajustes necessários a se fazer Rocha et al. (2023). Em relação ao instrumento GEDI, este tem iniciado sua operação apouco mais de 02 anos, o que suscita ainda incertezas e dúvidas relacionadas ao uso dos

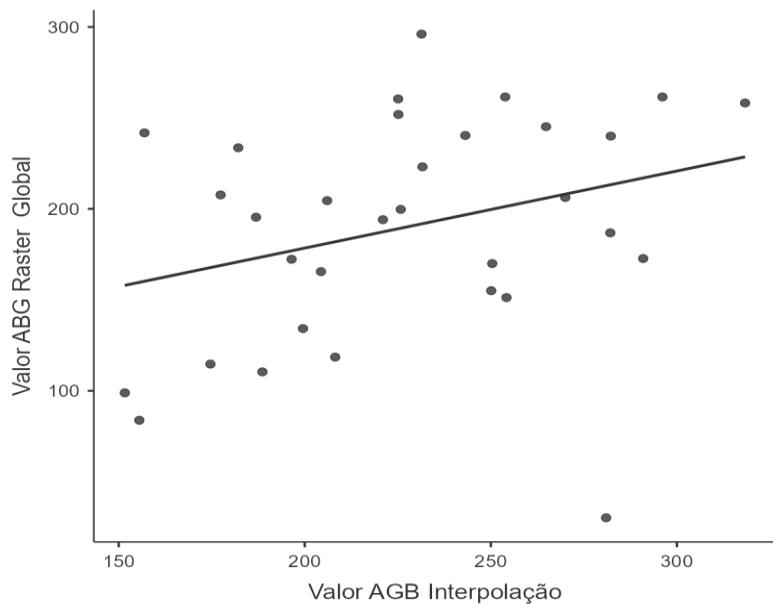
diversos dados produzidos pelo instrumento, principalmente os dados para biomassa florestal e para áreas de pequena extensão como é o caso da área submetida a pesquisa.

Romero et al. (2020) por meio de estudo desenvolvido em áreas de manejo florestal sustentável no município de Porto Acre para a quantificação de biomassa em indivíduos arbóreos potencialmente comerciais, encontrou o valor de $533,31\text{Mg ha}^{-1}$ para uma área de 1253,02 hectares de florestas com a utilização de métodos diretos de mensuração. Desta-se que neste trabalho que o valor foi estimado por indivíduo enquanto a quantificação estimada pelos dados do instrumento GEDI considera o valor do ponto geolocalizado que abrange um raio com dímetro aproximadamente 25 metros o que justifica o valor maior dos resultados pelos dados GEDI.

A correlação entre duas variáveis permite entender o quanto essas variáveis estão correlacionadas uma com a outra positiva ou negativamente. Dessa maneira como forma de testar os resultados dos valores de biomassa encontrados, foi realizado um teste de correlação com os valores de biomassa registrados pelo GRID global, da qual apresenta valores de biomassa para a toda a região da Amazônia. O teste consistiu na avaliação da existência de correlação entre os valores médio dos pixels de cada Unidade de Trabalho, com o valor do pixel do raster global com resolução espacial de 1x1km.

De acordo com o gráfico de correlação (Figura 13), observou-se a existência de correlação entre os valores, apesar de baixo, os testes apresentaram valor R de 0,304 e R^2 de 0,0923, dessa maneira constatou-se que os valores médios de biomassa acima do solo interpolados acompanham a tendência dos valores de biomassa médios do GRID global. A linha de tendência cresce na mesma proporção entre os valores de biomassa do GRID global e os valores de biomassa cima do solo obtidos por meio da interpolação dos dados, o que indica a existência correlação entre ambos os valores. Esse resultado positivo, não exime da necessidade de mais estudo sobre o tema.

Figura 13 - Correlação entre biomassa do GRID global e valor médio de biomassa estimada.



Fonte: autor, 2023

Para Smith (2022), os produtos L4B (GRID) são produtos mais recentes resultados dos produtos anteriores do GEDI, e que estes passaram por aprimoramentos e outras melhorias algorítmicas. Esse fator pode estar relacionado com os resultados sendo outro fator relevante a questão da escala.

4.4 CÁLCULO DO CARBONO A PARTIR DOS DADOS GEDI

4.4.1 Taxas de Carbono para Região Floresta Aberta com Bambu Densa - FABD

Com a obtenção dos valores de biomassa foi possível se chegar aos valores de Carbono que de acordo com Ferreira et tal (2016) equivale a 60% do peso seco de biomassa e desse valor 48% equivale ao carbono. Para as 03 Unidades de Trabalho, Caucheiro, Esperança II e Porongaba, foram encontrados um total de 246.8550,8 MgC estocados nessas áreas de floresta. Observou-se que os teores de carbono acompanham os índices de biomassa, ou seja, a espacialização do carbono acompanha proporcionalmente os valores de biomassa o que já era esperado uma vez que os valores de carbono estão associados aos valores de biomassa encontrados.

A Tabela 12, traz os respectivos valores estimados do carbono encontrado juntamente com dimensão da respectiva Unidade de Trabalho e os valores da biomassa estimados do GEDI por interpolação.

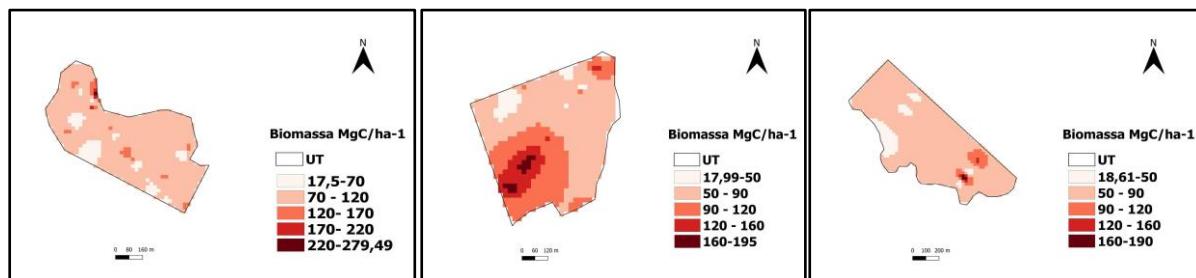
Tabela 12 - Estimativas de carbono para as três Unidade de Trabalho na região de Floresta Aberta com Bambu Densa – FABD.

Nome da UT	Área Total	Estimativa biomassa Mg (GEDI)	Biomassa Seca BS	Estimativa de Carbono MgC
<i>Caucheiro</i>	42,88	293.077,20	175.846,32	84.406,23
<i>Esperança II</i>	35,77	244.400,78	146.640,47	70.387,42
<i>Porongaba</i>	61,25	319.657,71	191.794,63	92.061,42
Total	139,9	857.135,69	514.281,42	246.855,07
Média/ha	46,63	6.126,77	3.676,06	1.764,51

Fonte: Autor, 2023.

Mg - Megagramas; BS - Biomassa Seca; **MgC** - Megagrama de Carbono.

Figura 14 - Mostra os mapas de distribuição de carbono estimados das três Unidades de Trabalho localizadas dentro da região de Floresta Aberta com Bambu Densa – FABD.



Fonte: Autor, 2023.

Observou-se também para estas 3 unidades a predominância das maiores taxas do valor de carbono se distribuindo entre os valores variando entre 160 a 279 MgC de carbono e em pequena extensão, essa espacialização pode ser observada conforme figura 14 acima.

4.4.2 Taxas de Carbono para Região Floresta Aberta com Bambu - FAB

Para esta região foram analisadas as mesmas 23 Unidades de Trabalho. Mantendo a lógica dos valores, essa foi a região de maior concentração de carbono proporcionalmente ao quantitativo da área 1.229,75 ha. Foram encontrados um total de 1.856.002,03 MgC áreas de florestas analisadas. Igualmente na análise da região anterior, no geral não foram encontrados fatores adversos e manteve-se a proporcionalidade entre a biomassa das áreas e o carbono estocado. A tabela 13 mostra a sistematização dos respectivos valores estimados da biomassa GEDI, biomassa seca e do carbono florestal em MgC.

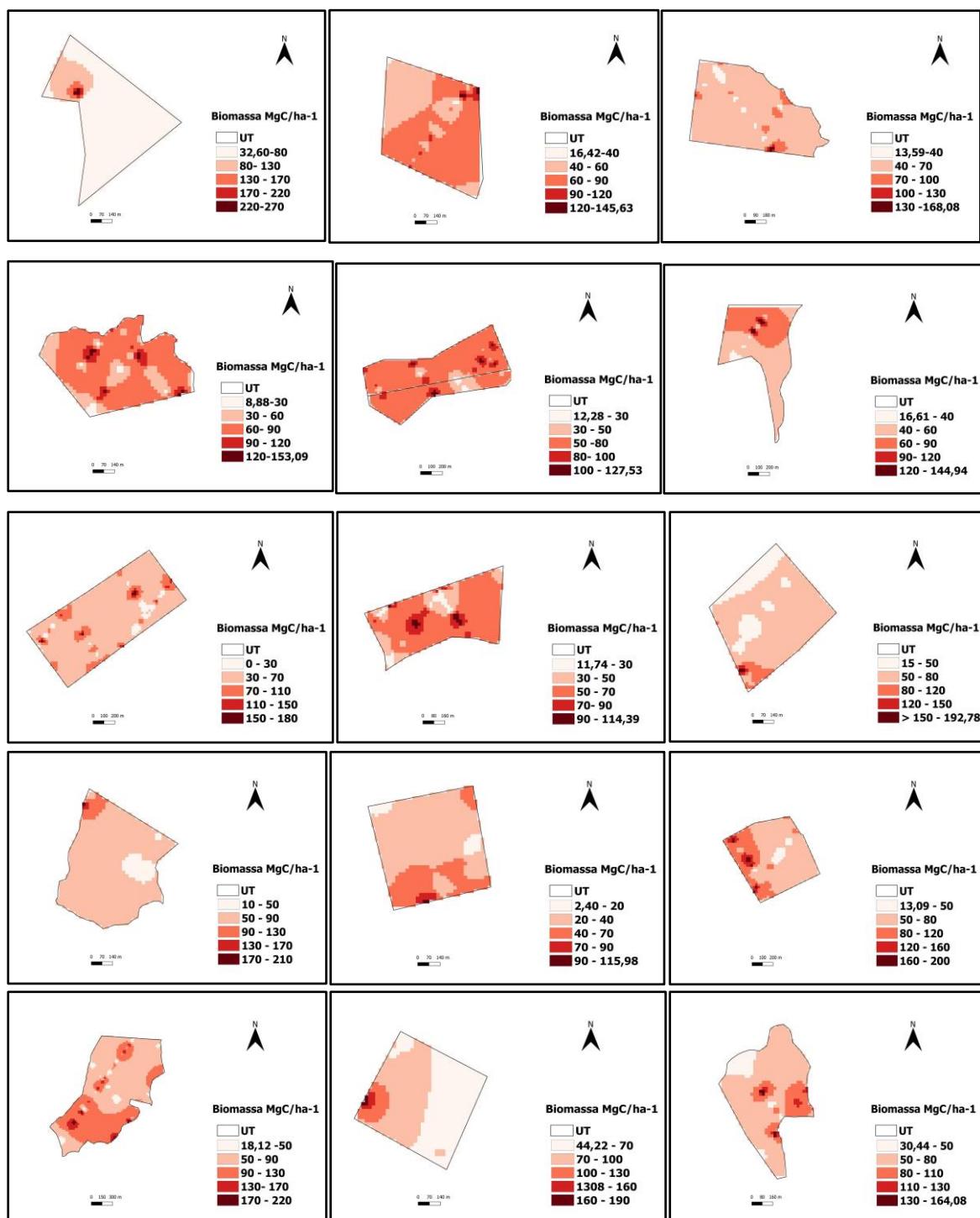
Tabela 13 - Estimativas de carbono para as 23 Unidade de Trabalho na região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.

<i>Nome da UT</i>	<i>Área Total</i>	<i>Estimativa biomassa Total (Mg) GEDI</i>	<i>Biomassa Seca BS</i>	<i>Estimativa de Carbono MgC</i>
Amansa Bravo	40,671	255.645,26	153.387,16	73.625,83
As Minas	41,133	253.975,90	152.385,54	73.145,06
Boa Vista II	60,42	225.358,36	135.215,02	64.903,21
Bom Jardim I	40,345	229.574,96	137.744,98	66.117,59
Bom Princípio I e III	61,371	343.779,38	206.267,63	99.008,46
Centrinho I	80,904	397.494,44	238.496,66	114.478,40
Centro Virgem II	40,198	182.965,55	109.779,33	52.694,08
Costa Rica I	41,133	188.277,28	112.966,37	54.223,86
Deserto	41,851	218.269,62	130.961,77	62.861,65
Enroscado I	41,812	216.808,21	130.084,93	62.440,76
Estreito I	43,236	145.434,78	87.260,87	41.885,22
Garimpo	42,907	265.143,79	159.086,27	76.361,41
Guarani	141,89	1.007.982,26	604.789,36	290.298,89
Gurgel II	40,5	247.156,29	148.293,77	71.181,01
Já Com Fome	42,238	244.140,40	146.484,24	70.312,44
Limeira II	40,182	144.930,44	86.958,26	41.739,97
Maloca II-III	63,166	244.140,40	146.484,24	70.312,44
Maloquinha I_II	40,51	270.645,49	162.387,29	77.945,90
Paxiúba I	41,392	152.464,04	91.478,42	43.909,64
São Pedro II	40,08	157.311,39	94.386,83	45.305,68
Sossego I	60,257	352.730,32	211.638,19	101.586,33
Tracoá III-IV	82,667	408.657,76	245.194,66	117.693,43
União	60,885	291.565,18	174.939,11	83.970,77
Total	1.229,75	6.444.451,50	3.866.670,90	1.856.002,03
Média/ha	53,47	5.240,47	3.144,28	1.509,25

Fonte: Autor, 2023.

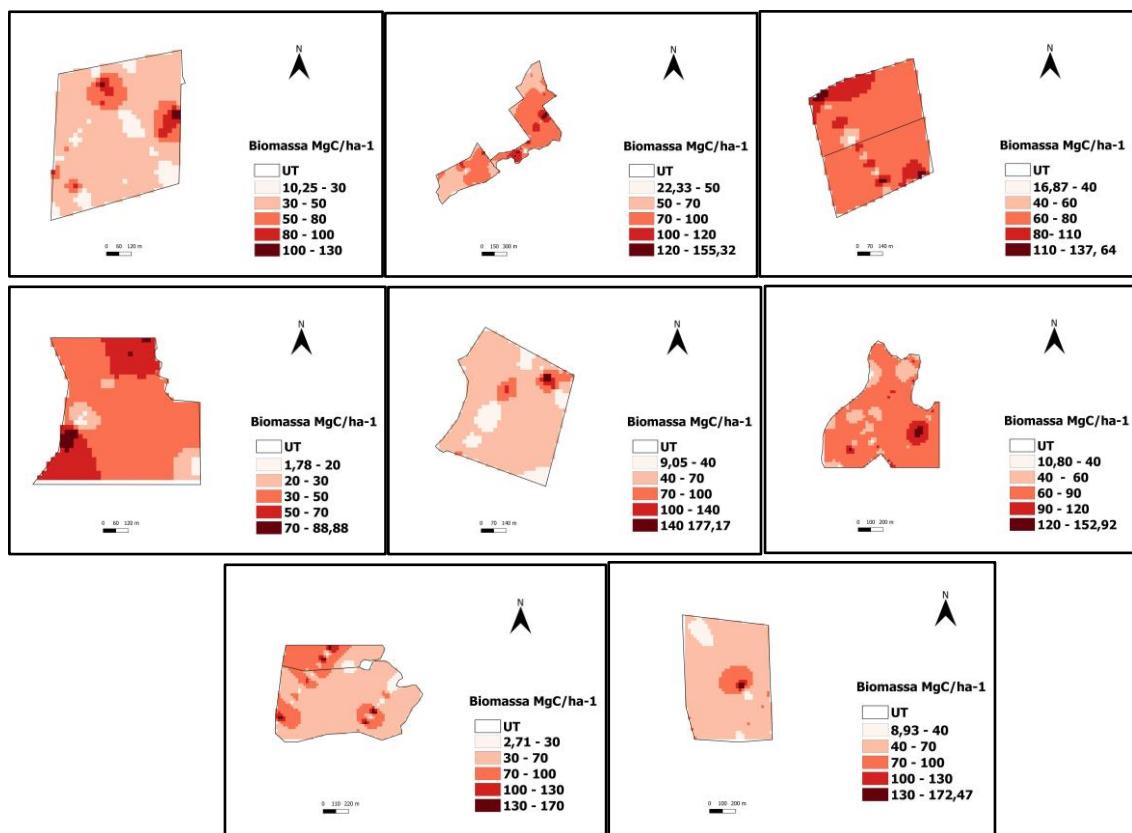
Já na sequência destacamos as Figuras 15A 15B onde apresenta a distribuição espacial referente aos valores de carbono encontrado para cada uma das unidades classificada dentro dessa tipologia florestal.

Figura 15A - Mostra os 15 mapas de distribuição do carbono estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 15B - Mostra a continuidade com mais 8 mapas de distribuição de carbono estimados dentro da região de Floresta Aberta com Bambu – FAB.



Fonte: Autor 2023.

Não foram observadas alterações significativas, as maiores taxas do valor de carbono também acompanharam a tendência da região de FABD se distribuindo entre os valores variando entre 88 a 270 MgC de carbono também em pequena extensão.

4.4.3 Taxas de Carbono para Região Floresta Aberta com Palmeira Aluvial - FAPa

Nesta análise foram estimadas as 11 Unidades de Trabalho localizadas na região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial. Essa região foi a segunda maior em termos de concentração de carbono proporcionalmente ao quantitativo da área de 403,20 ha. Foram encontrados nesta região aproximadamente 545.904,34 MgC nas áreas de florestas analisadas. Observou-se que os valores de carbono em cada Unidade ficaram todos abaixo de 100 MgC, obviamente acompanhando os índices de biomassa dessa região que na análise anterior demonstrou-se como o menor índice por hectare. A tabela 14 mostra a sistematização dos

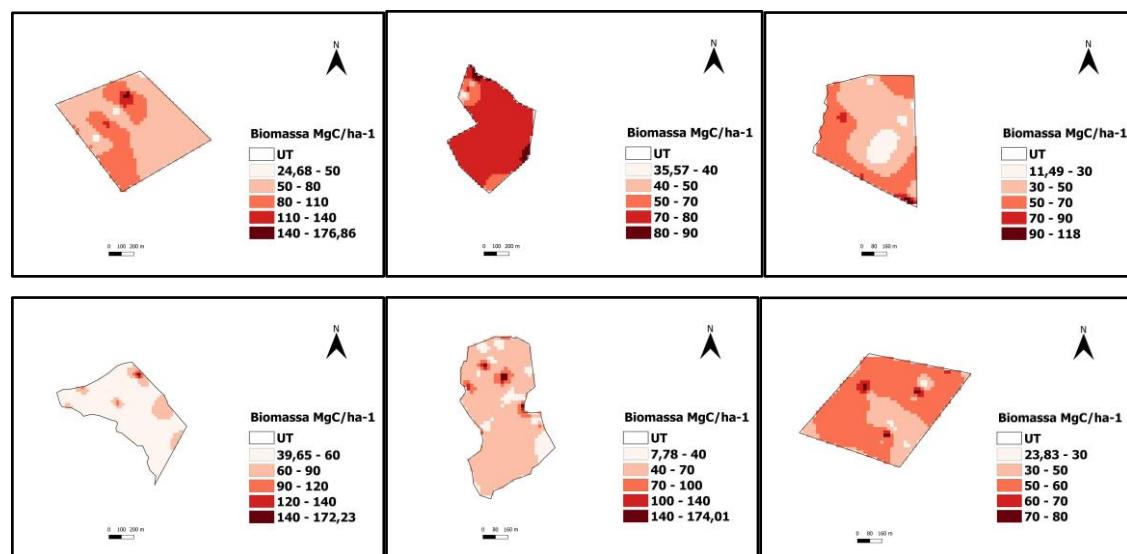
respectivos valores estimados da biomassa GEDI, biomassa seca e do carbono florestal em MgC. Na sequência observa-se a distribuição dos valores ilustrado por meio das Figura 16.

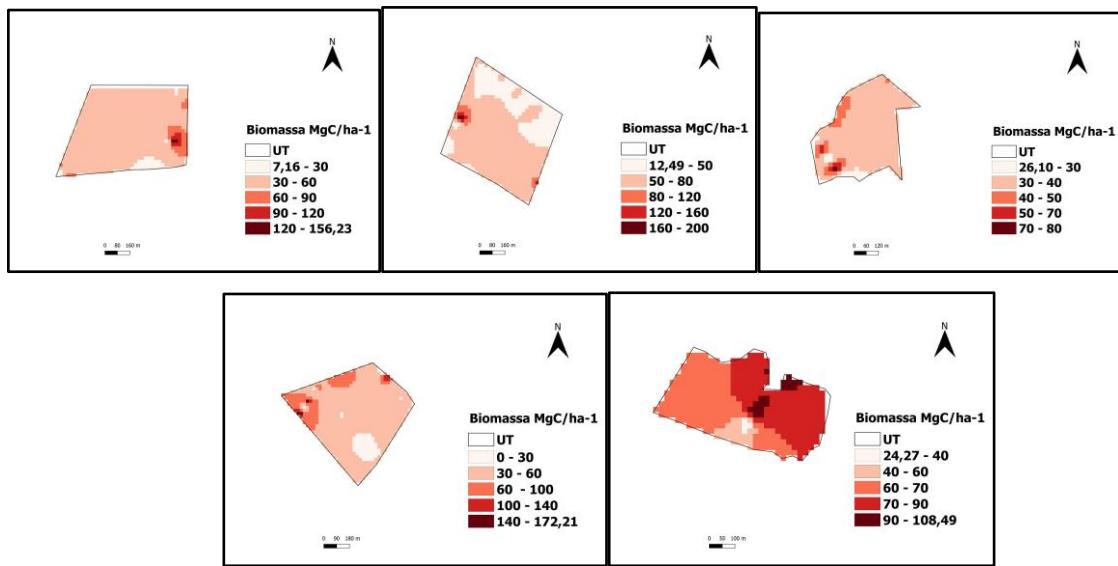
Tabela 14 - Estimativas de carbono para as 11 Unidade de Trabalho na região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa.

<i>Nome da UT</i>	<i>Área Total</i>	<i>Estimativa biomassa Total (mg) GEDI</i>	<i>Biomassa Seca BS</i>	<i>Estimativa de Carbono MgC</i>
Jarinal I	40,093	254.189,13	152.513,48	73.206,47
As Pedras I	40,589	225.358,36	135.215,02	64.903,21
Bom Futuro	40,116	155.030,36	93.018,22	44.648,74
Monte Verde	40,675	193.930,10	116.358,06	55.851,87
Monte Videl I	40,011	167.262,51	100.357,51	48.171,60
Já Começa II	44,513	195.321,55	117.192,93	56.252,61
Fonte Nova I	40,192	186.327,90	111.796,74	53.662,44
Uruqueu I	40,378	174.016,44	104.409,86	50.116,73
República	41,693	173.815,86	104.289,52	50.058,97
Morada Nova	16,834	61.507,46	36.904,48	17.714,15
Santa Maria	18,11	108.741,52	65.244,91	31.317,56
Total	403,2	1.895.501,19	1.137.300,71	545.904,34
Média/ha	36,65	4.701,10	2.820,66	1.353,92

Fonte: Autor 2023.

Figura 16 - Mostra 11 mapas de carbono estimados dentro da região de Floresta Aberta com Palmeira Aluvial – FAPa.





Fonte: Autor 2023.

As análises destas unidades evidenciaram que apesar de ser a região com a segunda maior quantidade de estoque de carbono proporcionalmente a área total, em função da quantidade de unidades, as taxas mínima e máxima apresentaram-se inferior em relação as outras duas regiões analisadas acima, ou seja, variou entre 7 a 172 MgC resultado dos valores de biomassa que apresentaram também esse uma breve inferioridade nas taxas em relação as duas outras regiões.

Junior (2007) destaca que a densidade de carbono da vegetação de florestas localizadas na Amazônia é variável, pois, existem diferentes tipos de vegetação com características de densidade de biomassa diferente. De acordo com autor em áreas de florestas densas a densidade de carbono foi estimada em 204, tC/ha.

Corte e Sanqueta (2007) em seu estudo sobre quantificação de carbono no estado do Paraná com o uso do sensoriamento remoto, ou seja, utilizando imagens multiespectrais para calcular os estoques de carbono para subsidiar plantios de reflorestamento encontraram os valores de 26.726.950,2 tC em uma área total de 516.163,58 ha, totalizando um valor de 51,780 tC/ha.

Para Melo 2017 em seu estudo sobre alometria de árvores e biomassa florestal na Floresta Estadual do Antimary no Acre, encontrou valores de biomassa seca em valores parecidos com os valores obtidos pelo método de quantificação direta. De acordo com o autor foram encontrados de pelo método de quantificação por nuvens de pontos o valor de 204 Mg/ha e parcelas de campo 203 Mg/ha de biomassa seca.

Nessa perspectiva quando se compara os resultados das estimativas das outras pesquisas citadas acima pelas quais foram utilizados métodos similares ao desta pesquisa, verifica-se que os valores encontrados por esta pesquisa estão próximos aos demais, apesar de utilizar dados de um instrumento orbital ainda recente pouco utilizado para a Amazônia e com certa dificuldade de manipulação de seus dados.

4.5 CONCLUSÃO

O uso dos dados GEDI juntamente com o uso de ferramentas de geoprocessamento sensoriamento remoto além de cálculos estatísticos que possibilitaram conhecer os valores de biomassa e do carbono estocado acima do solo para áreas de florestas nativas. Destaca-se que a obtenção dos valores foi possível devido a disponibilidade de cobertura de dados GEDI para a região estudada.

Foi possível predizer o quantitativo de biomassa acima do solo bem como o quantitativo de carbono estocado nessas parcelas de floresta nativa submetidos à pesquisa. Com os resultados alcançados foi possível a obtenção de números, ou seja, o quanto de carbono será liberado para atmosfera caso essas áreas sejam submetidas ao corte raso ou quanto desse carbono será estocado ou “sequestrado” caso estas mesmas áreas de floresta sejam mantidas preservadas.

Os resultados também demonstraram algumas desvantagens de trabalhar os dados GEDI associado a imagens multiespectrais do sensor Landsat 8 e índices de vegetação gerados para esta área de estudo especificamente, no entanto, as informações contidas nos dados GEDI, permitiram a continuidade da pesquisa por meio da realização de outra metodologia para a obtenção dos objetivos propostos.

Destaca-se o uso da geotecnologia associado a cálculos geoestatísticos como ferramentas de apoio e que possibilitou a realização de testes e análises para a obtenção dos resultados, a versatilidade de uso dessas ferramentas possibilitou o alcance dos objetivos propostos pela pesquisa. Destaca-se ainda sobre os dados GEDI, que pelo fato de serem dados recentes, dificuldade de acesso aos dados e poucos trabalhos de pesquisa principalmente para região Amazônica, foram algumas dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Apesar destas dificuldades, conclui-se que com a utilização das técnicas adequadas, conhecimento específico básico sobre e domínio de softwares específicos de análises

geoespacial é possível a utilização dos dados do instrumento GEDI para a obtenção dos valores de biomassa e carbono florestal acima do solo, portanto, mais possibilidades disponíveis a serviço da pesquisa.

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO

Sabemos do desafio que tem os órgãos gestores na manutenção dessa importante área de cobertura florestal do estado Acre que é a Reserva Extrativista Chico Mendes. Já se passaram mais de 30 anos desde sua criação, ao longo desse período muitas mudanças têm ocorrido principalmente o aumento do desflorestamento da área. Ao mesmo tempo não podemos desconsiderar a população residente na unidade, moradores que tem nestas áreas de floresta o “seu lugar de vida” são delas que tiram seu sustento familiar e que, portanto, requer o cuidado necessário para a garantia de manutenção desses “lugares.”

A pauta do desmatamento não é uma discussão recente, e a Unidade de Conservação não está isenta dessa discussão apesar dos esforços empregados pelos dos órgãos gestores no combate ao desmatamento na Unidade. A forte pressão antrópica sobre ela é uma realidade e os resultados em resposta a minimizar essa pressão sobre o ecossistema florestal não tem acompanhado na mesma proporção e em tempo hábil. Portanto, abre-se precedente a questionamentos como, por exemplo, como conciliar a permanência dessas pessoas em suas áreas de origem envolto ao atual cenário econômico que inclui a retirada gradual da floresta? Como manter a característica e finalidade primeira da Unidade de Conservação meio a esse cenário?

No contexto geral a presente pesquisa não buscou responder a tais questões, mas buscou apontar por meio de testes científicos, mais informação sobre estas áreas, ou seja, informação para que a floresta não seja vista apenas como uma floresta em si. Com a pesquisa pode-se compreender quantitativamente o quanto vale a floresta em pé por meio do potencial de biomassa existente e o quanto de carbono pode ser estocado ou mesmo liberado para a atmosfera no caso de desmatamento. Essas questões enriquece o diálogo em relação a preservação da área e em relação ao desmatamento que ocorre gradativamente na Unidade de Conservação sob tudo sobre a questão do comércio de carbono.

A experiência de trabalhar com dados recentes do sistema GEDI possibilitou a reflexão acerca dos avanços necessários para o desenvolvimento de pesquisas dessa natureza, principalmente com uso de dados espaciais mais recentes e mais robustos de informações sobre

diferentes ecossistemas. Durante a pesquisa observou-se muitos desafios para o uso dos dados. Nessa perspectiva recomenda-se a necessidade de investimentos principalmente na formação acadêmica do profissional que atua no campo das geotecnologias com o aprofundamento de conhecimentos técnicos acerca destes temas de maneira a preparar cada vez mais esses profissionais.

A pesquisa permitiu também o experimento, o contato com técnicas, que permitem a realização de cálculos específicos e uso de software específicos principalmente com linguagem de programação como python por exemplo, e que requer dedicação e investimento em capacitação para a realização de processamentos envolvendo esses temas. No geral a experiência com essas novas geotecnologias foi extremamente proveitosa para meu aprendizado profissional.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **NBR 10520**: informação e documentação: apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro, ago. 2002 b.

_____. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: Apresentação. 3. ed. Rio de Janeiro, abr. 2011.

ACRE. **Recursos naturais: biodiversidade e ambientes do Acre. ZEE/AC, fase II, escala 1:250.000** / Programa Estadual de Zoneamento Ecológico. - Rio Branco: SEMA Acre, 2010. 130 p. _ (Coleção Temática do ZEE; v. 3)

Acre. Secretaria de Estado de Meio Ambiente

ANDERSEN, HANS-ERIK, FOSTER, JEFFREY R, REUTEBUCH STEPHEN E. Estimating Forest Structure Parameters on Fort Lewis Military Reservation using Airborne Laser Scanner (LIDAR). Disponível em: www.fs.usda.gov/treesearch/pus/7353. Acesso em: 22/06/2022.

ARAGÓN. L. E. **A dimensão internacional da Amazônia: um aporte para sua Interpretação**. Universidade Federal do Pará (UFPA). Rev. Presidente Prudente ano 21, n. 42, pp. 14-33 Dossiê - 2018 ISSN: 1806-6755.

ARAGÓN. L. E. **A dimensão internacional da Amazônia: um aporte para sua Interpretação**. Universidade Federal do Pará (UFPA). Rev. Presidente Prudente ano 21, n. 42, pp. 14-33 Dossiê - 2018 ISSN: 1806-6755.

ASNER. Gregory P. *et al*. Selective Logging in the Brazilian Amazon. 21 october 2005 vol 310 **Science**. No. 5747. DOI. 10.1126/science.1118051. Disponível em: www.sciencemag.org. Acesso em: 18/06/2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informações e documentação: referências: Elaboração. 2. ed. Rio de Janeiro, nov. 2018. Rio de Janeiro, 2018.

BORATTO. I. M. de P; GOMIDE. R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

CÂMARA, G.; VALERIANO, D.M.; SOARES, J.V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. 24 p

CASARI, G H das C N. **Estimativa de biomassa por sensoriamento remoto: um potencial para avaliação da produção de energia.** Gabriel Henrique das Chagas Noqueli Casari. – Brasília, DF, 2018- 66 p.: il. (algumas color.); 30 cm.

CASSOL, Henrique Luiz Godinho. **Estimativa de Biomassa e estoque de Carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos.** 2013. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CASTRO, E. A.; KAUFFMAN, J.B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root biomass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*, Cambridge, v.14, p.263-283, 1998. Disponível em:<<http://www.floresta.ufpr.br/firelab/artigos/artigo40.pdf>>. Acesso em: 21 setembro 2013.

CHANG, Manyu. Sequestro de carbono florestal: oportunidades e riscos para o Brasil. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, Curitiba, n. 102, p. 85-101, jan./jun. 2002. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/bibliotecaonline/Record/8316>. Acesso em: 20/07/2021.

CORTE, Ana Paula Dalla.; SANQUETTA, Carlos Roberto. KIRCHNER, Flávio Felipe.; ROSOT, Nelson Carlos. Os Projetos de redução de emissões do desmatamento e da degradação florestal (REDD). **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 1, p. 177 - 188, jan./mar. 2012. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/26316/17515>. acesso em: 17/06/2021.

CORTE, Ana Paula; SANQUETTA Carlos Roberto. Quantificação do estoque de carbono fixado em reflorestamentos de Pinus na área de domínio da Floresta Ombrófila Mista no Paraná. **CERNE** [en linea]. 2007, 13(1), 32-39[fecha de Consulta 29 de Septiembre de 2023]. ISSN: 0104-7760. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74413105>

DUBAYAH *et al.* GEDI Launches a New Era of Biomass Inference from Space. **IOP science** P. 56. Disponível em: <https://eartharxiv.org/repository/view/3278/> Acesso em: 27/06/2022.

DUBAYAH *et al.* 2021. **GEDI L3 Gridded Land Surface Metrics, Version 2.** ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAA/1952>

EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento.** Campinas, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento> . Acesso em: 16 jan. 2023

FEARNSIDE, P.M. 2020. **Desmatamento na Amazônia brasileira:** História, índices e consequências. p. 7-19. In: Fearnside, P.M. (ed.) Destrução e Conservação da Floresta Amazônica, Vol. 1. Editora do INPA, Manaus, Amazonas. 368 p. (no prelo). Disponível em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2005/Desmatamento%20historia-Megadiversidade.pdf Acesso em: 26/03/2020.

FEARNSIDE, P.M. Biomassa das Florestas Amazônicas brasileiras. In Emissão x sequestro de CO₂ uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. **Anais do Seminário**. Companhia Vaie do Rio Doce, Rio de Janeiro. 1994. p 95-124.

FERRAZ, A. S.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C. A. S. A. GLERIANI, J. M. Uso de imagens do satélite IKONOS II para estimar biomassa aérea de um fragmento de floresta estacional semidecídua. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, p. 2794 – 2801, 2013.

FERRAZ. A. S. Estimação dos estoques de biomassa e carbono na parte aérea de um fragmento de floresta estacional semidecídua por meio de imagens de satélite Ikonos II. Tese de Doutorado (*Doctor Science*). Viçosa. Minas Gerais. 2012. 88f.

FLORENZONO, T. G. **Iniciação Em Sensoriamento Remoto**. 3^a Edição Ampliada e atualizada. São Paulo. Oficina e Textos. 2011.

FONSECA, M. do P. S. A. da. **A certificação florestal e os Vendedores de árvores: um estudo da Floresta Estadual do Antimary**. 2008. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2008. 100f.

FITTI PALDY. M C P de M; CASTELO. C E F. Há boi pastando, há desmatamento e outras coisas mais: o retrato da resex chico mendes. **Conexões**. Periódicos UFPA. Belém v. 9 n. 2, p. 35-68 julho 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/Conexoes/article/view/13749>. Acesso em: 17/10/2023.

For Landsat 8-9 OLI/TIRS: Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46-56. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>. Acesso em: 12/03/2023.

GIONGO. Marcos *et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais*. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/148/133>. Acesso: 23/09/2022.

Hentz, A. M. K, Ruza. M. S, Corte. A. P., D, Sanquetta. C. R. Técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa em ambientes florestais. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.10, n.18; p. 2810 2014. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/2889>. Acesso em: 15/05/2021.

HIGUCHI, Niro. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia central. **FLORESTA** 34 (3), Set/Dez 2004, 295-304. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/26316/17515>. acesso em: 20/07/2021.

IMAZON. **Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia.** c2018. Desmatamento. Disponível em: <<https://amazon.org.br>>. Acesso em: 27 de abril de 2020.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Divisão De Sensoriamento Remoto. **Lidar.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2022. On Line. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/lidar/capa-lidar>. Acesso em: 14/06/2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Divisão de Geração de Imagens.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2022. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelite> Acesso em: 29 de outubro de 2022.

JÚNIOR. H. N. de M. *et al.* **Aplicações de sensoriamento remoto para o monitoramento do desmatamento da Amazônia.** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril. 2007. INPE, p. 6835-6842.

JUNIOR. M. R. L. **O valor econômico do carbono emitido pelo processo de desmatamento da Amazônia como instrumento de conservação florestal.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. 93 fl. São Paulo 2007.

LAURANCE W. F. **Can Carbon Trading Save Vanishing Forests?.** 286 Bio Science. April 2008/Vol. 58No. 4.

LEFSKY et al. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes. *Global Ecology & Biogeography* (2002) 1 1,393-399. **Science Ltd.** Disponível em: <http://www.blackwell-science.com/geb>. Acesso em: 22/06/2022.

LIMA, Laís Cristina Chaves de. **Estoque de biomassa e carbono em uma área manejada na Floresta Estadual do Antimary.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Gestão Florestal), Universidade Federal do Paraná. Rio Branco-AC.

LOPES et al. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.14, n.11, p.1210 -- 1219, 2010 Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br> Acesso em: 25/10/2022.

MASCARENHAS. F. de S.; BROWN. I. F.; SILVA. S. S. da. Desmatamento e incêndios florestais transformando a realidade da Reserva Extrativista Chico Mendes. Edição especial: **30 Anos do Legado de Chico Mendes Vol. 48**, novembro de 2018. DOI: 10.5380/dma.v48i0.58826. e-ISSN 2176-9109. D e M Desenvolvimento e Meio Ambiente. UFPR. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/58826/36969> Acesso em 26/10/2022.

MELO , A. W. F de. **Alometria de Árvores e Biomassa Florestal na Amazônia Sul Ocidental.** 154 f.: il. Tese (Doutorado). INPA, Manaus, 2017.

MELO. E. T.; SALES. M. C. L.; OLIVEIRA. J. G. B. de. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (ndvi) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do riacho dos cavalos, Crateús-CE. **RA E GA O Espaço Geográfico em Análise**. 23 (2011), p. 520-533 Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR. Disponível em: www.geografia.ufpr.br. Acesso em: 25/10/2022.

NETO, I. A. **Uso de ferramentas de SIG e sensoriamento remoto para o monitoramento do desmatamento em unidades de conservação: estudo de caso da Floresta Nacional do Bom Futuro -RO**. Porto Velho, Rondônia, 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) Fundação Universidade Federal de Rondônia / UNIR. 112f.: il.

PAGIOLA S; GLEHN H. C. V; Taffarello D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, 2013. 336p.: il. color.; 19 x 25 cm.

RODRIGUES, M. A. **Dinâmica espacial do desmatamento no estado do Acre entre 1999 e 2010: o papel do zoneamento ecológico-econômico**. Campinas, SP: [s.n.], 2014.

ROMERO, F. M. B et al. Quantificação da Biomassa e estoque de carbono em áreas sob manejo sustentável no estado do Acre. **Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidades**. 2020 . Cap 56. pg. 720-730. DOI 10.37885/20090123. Acesso: 28/07/2023.

RUDORFF, B. F. T. **Produtos de Sensoriamento Remoto**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Divisão de Sensoriamento Remoto Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 17 de abr. de 2020.

SARAIVA et al. Construção de mosaicos temporais normalizados de imagens planet. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE. Santos -SP, Brasil.

SCHIKOWSKI, A. B; Corte, A. P. D; Sanquetta, C. R; Modelagem do crescimento e de biomassa individual de Pinus. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 33, n. 75, p. 269-278, jul./set. 2013.

SILVEIRA. P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, jan./mar. 2008.

SMITH J. M. **Ornl Daac Releases GEDI Level 4B Dataset Offering Gridded Estimates of Aboveground Biomass Density**. Nasa Earth Data. Open Acces For Open Science. Disponível em: <https://www-earthdata-nasa-gov.translate.goog/learn/articles/gedi-l4b> Acesso: 03/07/2023.

SOUZA, C. R. et al. Dinâmica florestal e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. **Acta Amazônica**, v. 42(4) 2012 p. 501-506. Disponível em:

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65580/1/Actav42n4a07.pdf>. Acesso em: 18/06/2021.

TRAINDADE et al. Relação espetro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista Ciências Agrárias**. Cienc. Agrar., v. 62, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.29281Rev>. Acesso em: 05/07/2023.

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**, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

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**. Curitiba: UFPR, 2003. 120f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

YU, Chang Man. **Sequestro Florestal De Carbono No Brasil –Dimensões Políticas, Socioeconômicas E Ecológicas**. 2004. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.