



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

MARIA MAIANY PAIVA LIMA

**USO DE IMAGENS SENTINEL PARA ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO
E BIOMASSA ACIMA DO SOLO NO BIOMA CAATINGA**

FORTALEZA

2021

MARIA MAIANY PAIVA LIMA

USO DE IMAGENS SENTINEL PARA ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO E
BIOMASSA ACIMA DO SOLO NO BIOMA CAATINGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

Coorientadora: Profa. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L699u Lima, Maria Maiany Paiva.
Uso de imagens Sentinel para estimativa do estoque de carbono e biomassa acima do solo no bioma Caatinga / Maria Maiany Paiva Lima. – 2021.
105 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.
Coorientação: Profa. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo.
1. Produtividade primária líquida. 2. Floresta tropical sazonalmente seca. 3. Sentinel 1 e 2. 4. Sensoriamento remoto. 5. Fitossociologia. I. Título.

CDD 630

MARIA MAIANY PAIVA LIMA

USO DE IMAGENS SENTINEL PARA ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO E
BIOMASSA ACIMA DO SOLO NO BIOMA CAATINGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 26 / 03 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Christine Farias Coelho
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof^ª. PhD. Jorge Mongil Manso
Universidade Católica de Ávila – Espanha

Prof^ª. Dra. Waleska Martins Eloi
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

A Deus.

Ao meu esposo, Jonnas.

Aos meus pais, Raimundo e Fátima.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço também a Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), na pessoa da Sr.^a Ivina Magalhães e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em especial ao Sr. Carlos Taniguchi, por toda estrutura e tecnologia fornecida durante o curso.

A comunidade do Assentamento 25 de maio, em especial a escola João Sem Terra por ter disponibilizado seus laboratórios para a pesquisa.

Aos professores Carlos Alexandre e Isabel Cristina, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora, Christine Coelho, Jorge Manso e Waleska Eloi, Adunias Teixeira e Cicero Almeida, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas de turma de mestrado e ao grupo de pesquisa HIDROSED, na pessoa do professor José Carlos, pelas reflexões, críticas e sugestões.

Aos meus pais e ao meu esposo, que além do apoio e companheirismo, trabalharam diretamente no desenvolvimento dessa pesquisa.

“Compreender as coisas que nos rodeiam é a melhor preparação para compreender o que há mais além.” (Hipátia de Alexandria)

RESUMO

A biomassa é um recurso natural vital para funcionamento da biosfera, a quantificação e monitoramento desta é necessária para o melhor planejamento e gestão do seu uso. Os métodos baseados em dados de sensoriamento remoto (SR) para quantificá-la fornecem uma visão sinótica e são aplicáveis a áreas extensas e inacessíveis, cujo desempenho depende das características do sensor e alvo. Diante disso, objetivou-se avaliar o estoque de carbono e a biomassa acima do solo nos estratos da Caatinga, uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS), a partir de dados de SR e dados obtidos no campo. A metodologia dividiu-se em três etapas: i) determinação da biomassa e estoque de carbono *in situ*; (ii) análise baseada em dados de sensoriamento remoto do sensor multiespectral MSI/Sentinel-2 e do radar SAR-C/Sentinel-1; e (iii) análise da relação entre dados de campo e SR. A relação foi obtida por meio de regressão linear múltipla gerando modelos empíricos para obtenção de biomassa e estoque de carbono e, com base nesses modelos, foi realizado o mapeamento desses parâmetros. A biomassa lenhosa apresentou forte relação com o diâmetro do caule das árvores e, no que diz respeito aos dados de SR, os melhores preditores foram as bandas *red-edge* e seus índices derivados. Quanto aos modelos para estimar biomassa lenhosa, o baseado em imagens da estação chuvosa apresentou desempenho superior ao que utiliza imagens da estação seca, cujos coeficientes ajustados foram de 0,78 e 0,53 respectivamente. Porém, ambos resultaram em uma espacialização adequada da biomassa de acordo com o uso do solo e as diferentes fisionomias de vegetação encontradas na área. Quanto à biomassa herbácea, o melhor modelo apresentou coeficiente de determinação ajustado igual a 0,54 com espacialização homogênea e identificação genérica das áreas preservadas e antropizadas. Logo, os modelos gerados foram capazes de prever a biomassa herbácea e lenhosa para qualquer estação do ano em área de FTSS.

Palavras-chave: Produtividade primária líquida. Floresta tropical sazonalmente seca. Sentinel-1 e 2. Sensoriamento remoto. Fitossociologia.

ABSTRACT

Biomass is a vital natural resource for the functioning of the biosphere, its quantification and monitoring are necessary for better planning and management of use. The methods based on remote sensing (SR) data to quantify it provide a synoptic view and they are applicable into large and inaccessible areas, of which performance depends on the characteristics of the sensor and target. Therefore, the objective was to evaluate the carbon stock and aboveground biomass in the strata of the Caatinga, a Seasonally Dry Tropical Forest (FTSS), using SR data and data obtained in the field. The methodology was divided into three stages: i) determination of biomass and carbon stock in situ; (ii) analysis based on remote sensing data from the MSI/Sentinel-2 sensor and the SAR-C/Sentinel-1; (iii) and analysis of the relationship between field and SR data. The relationship was accessed by means of multiple linear regression generating empirical models for obtaining biomass and carbon stock, and based on these models, the mapping of these parameters was carried out. The biomass showed a strong relationship with the diameter of the tree stems and as for the SR data, the best predictors were the red-edge bands and their derived indexes. As for the models for estimating woody biomass, the one based on images of the rainy season showed a better performance than the one using images of the dry season, whose adjusted coefficients were 0.78 and 0.53 respectively. But both resulted in an adequate spatialization of the biomass of according to the use of the soil and the different physiognomies of vegetation found in the area. As for herbaceous biomass, the best model presented an adjusted determination coefficient equal to 0.54 with homogeneous spatialization and generic identification of preserved and anthropized areas. Therefore, the generated models were able to predict the herbaceous and woody biomass for any season in the FTSS area.

Keywords: Primary net productivity. Seasonally dry tropical forest. Sentinel 1 and 2. Remote sensing. Phytosociology.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | – Estratos da vegetação do bioma Caatinga | 22 |
| Figura 2 | – Reservatórios de carbono que implicam na quantificação da biomassa florestal | 24 |
| Figura 3 | – Bandas do sensor MSI/Sentinel-2 e o comportamento espectral de diferentes alvos | 34 |
| Figura 4 | – Geometria de medição de um sistema de radar de geração de imagens | 38 |
| Figura 5 | – Localização da área de estudo | 42 |
| Figura 6 | – Esquema das parcelas aninhadas para obtenção da biomassa lenhosa e biomassa herbácea | 44 |
| Figura 7 | – Coleta de material herbáceo em campo na sub-parcela de 1 m ² no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 45 |
| Figura 8 | – Análise do teor de carbono nas amostras do estrato herbáceo da vegetação no analisador de carbono orgânico total TOC-VCPN da marca shimadzu® | 46 |
| Figura 9 | – Medição da Circunferência na Altura do Peito – CAP de árvore em parcela experimental no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 47 |
| Figura 10 | – Fluxograma das etapas para a obtenção da biomassa e estoque de carbono partir de dados de sensoriamento remoto dos instrumentos MSI/Sentinel-2 e SAR-C/ Sentinel-1 | 54 |
| Figura 11 | – Curva espécie-área do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 55 |
| Figura 12 | – Índice de Valor de Importância (IVI) das espécies do estrato lenhoso amostradas em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 58 |
| Figura 13 | – Classes de diâmetro das espécies do estrato lenhoso amostradas em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 59 |
| Figura 14 | – Distribuição dos grupos ecológicos por espécies, indivíduos e espécies com Índice de Valor de Importância - IVI > 10 do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 60 |
| Figura 15 | – Distribuição dos grupos ecológicos em cada classe de vegetação do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 16 – Relação entre a biomassa lenhosa e área basal (A) e relação entre a biomassa lenhosa e a área densidade relativa (B) no levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 63 |
| Figura 17 – Relação entre a biomassa lenhosa e os grupos ecológicos presentes em cada parcela do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 64 |
| Figura 18 – Biomassa e teor de carbono do estrato herbáceo nas parcelas do levantamento em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 65 |
| Figura 19] – Biomassa lenhosa e biomassa herbácea em relação a biomassa total nas parcelas do levantamento em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 66 |
| Figura 20 – Relação entre o coeficiente de retroespalhamento e a biomassa lenhosa nas diferentes fisionomias de vegetação da Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE..... | 67 |
| Figura 21 – Relação entre o os coeficientes de retroespalhamento e a biomassa lenhosa na estação chuvosa e na estação seca | 68 |
| Figura 22 – Relação entre os componentes de retroespalhamento e a biomassa herbácea.. | 69 |
| Figura 23 – Comportamento espectral das imagens em parcelas com diferentes quantidades de biomassa no período chuvoso e no período seco | 70 |
| Figura 24 – Comportamento espectral das imagens em parcelas com diferentes quantidades de biomassa no período chuvoso e no período seco | 71 |
| Figura 25 – Comportamento espectral das imagens em parcelas com quatidades de biomassa inferior a 39,0 Mg ha ⁻¹ no período chuvoso e no período seco | 72 |
| Figura 26 – Comportamento de cada banda do sensor em cada uma das 50 parcelas em relação a biomassa lenhosa na estação chuvosa (A), a biomassa herbácea (B) e a biomassa lenhosa na estação seca (C) | 73 |
| Figura 27 – Análise de Componentes Principais da biomassa lenhosa e herbácea com os dados de sensoriamento remoto da estação chuvosa..... | 77 |
| Figura 28 – Análise de Componentes Principais da biomassa lenhosa e herbácea com os dados de sensoriamento remoto da estação seca | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 – Gráficos de dispersão entre os valores preditos pelos modelos desenvolvidos e a biomassa observada em campo. Modelo para estimativa de biomassa lenhosa na estação chuvosa (A); modelo para estimativa de biomassa herbácea (B) e modelo para a estimativa da biomassa lenhosa na estação seca (C) | 86 |
| Figura 30 – Distribuição espacial da biomassa lenhosa no Assentamento 25 de Maio pelo modelo 2LCA, que tem como base imagens do sensor MSI/Sentinel-2 durante a estação chuvosa | 88 |
| Figura 31 – Uso e ocupação do território do Assentamento 25 de Maio de acordo com o Cadastro Ambiental Rural – CAR | 89 |
| Figura 32 – Distribuição espacial da biomassa lenhosa no Assentamento 25 de Maio pelo modelo 2LSA, que tem como base imagens do sensor MSI/Sentinel-2 durante a estação seca | 90 |
| Figura 33 – Distribuição espacial da biomassa herbácea no Assentamento 25 de Maio pelo modelo 2HA, que tem como base imagens do sensor MSI/Sentinel-2 durante a estação chuvosa | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | - Características espectrais e espaciais do sensor MSI/Sentinel-2A e 2B | 33 |
| Tabela 2 | - Variáveis a serem obtidas a partir do sensor MSI/Sentinel-2 | 50 |
| Tabela 3 | - Parâmetros fitossociológicos das espécies do estrato lenhoso amostradas em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE | 57 |
| Tabela 4 | - Cargas fatoriais padronizadas com base na matriz de correlação e comunalidade das variáveis utilizando dados de imagens da estação chuvosa | 76 |
| Tabela 5 | - Cargas fatoriais padronizadas com base na matriz de correlação e comunalidade das variáveis utilizando dados de imagens da estação chuvosa | 78 |
| Tabela 6 | - Resumo dos modelos de regressão múltipla pelo método <i>stepwise backward</i> para cada tipo de biomassa | 80 |
| Tabela 7 | - Resumo dos modelos de regressão múltipla ajustados | 82 |
| Tabela 8 | - Validação dos Modelos de Regressão | 84 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| 12H | Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 |
| 1H | Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-2 |
| 2H | Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1 |
| 12LC | Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 |
| 1LC | Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1 |
| 2LC | Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados |
| 12T | Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 |
| 1T | Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1 |
| 2T | Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-2 |
| 12LS | Modelo de biomassa total com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 |
| 1LS | Modelos de biomassa total com dados Sentinel-2 |
| 2LS | Modelos de biomassa total com dados Sentinel-1 |
| 12HA | Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 |
| 1HA | Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-2 |
| 2HA | Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1 |
| 12LCA | Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 ajustado |
| 1LCA | Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1 ajustado |
| 2LCA | Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados ajustado |
| 12TA | Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 ajustado |
| 1TA | Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1 ajustado |
| 2TA | Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-2 ajustado |
| 12LSA | Modelo de biomassa total com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 ajustado |
| 1LSA | Modelos de biomassa total com dados Sentinel-2 ajustado |
| 2LSA | Modelos de biomassa total com dados Sentinel-1 ajustado |
| BOA | Reflectância Corrigida na Base da Atmosfera |
| CA | Caatinga Arbórea |
| CAA | Caatinga Arbustiva Aberta |
| CAD | Caatinga Arbustiva Densa |

| | |
|-----------------|---|
| CAR | Cadastro Ambiental do Rural |
| CE | Comissão Europeia |
| cm | Centímetros |
| CNB | Circunferência na Base |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| DAP | Diametro do Caule na Altura do Peito |
| DA | Densidade Absoluta |
| dB | Decibéis |
| DoA | Dominância Absoluta |
| DoR | Dominância Relativa |
| DR | Densidade Relativa |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| ESA | Agência Espacial Europeia |
| FA | Frequência Absoluta |
| FR | Frequência Relativa |
| FTSS | Floresta Tropical Sazonalmente Seca |
| GE | Grupo Ecológico |
| GMES | Global Monitoring for Environment and Security |
| GRD | Ground Range Detected |
| ha | Hectare |
| IAF | Índice de Área Foliar |
| IPCC | Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas |
| IRECI | Índice de Clorofila Red-Edge Invertido |
| IVI | Índice de Valor de Importância |
| INCRA | Instituto de Colonização e Reforma Agrária |
| Kg | Kilograma |
| m | Metro |
| mm | Milímetro |
| Mg | Megagrama |
| MSI | MultiSpectral Instrument |
| MST | Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra |
| MWh | Megawatt-hora |
| NIR | Infravermelho Próximo |

| | |
|----------|--|
| NDVI | Índice de Vegetação da Diferença Normalizada |
| ND15 | Índice de Vegetação da Diferença Normalizada no SWIR 1 |
| NI | Número de Indivíduos |
| nm | Nanômetro |
| PSRI | Índice de Refletância de Senescência de Plantas |
| PRESS | Predicted Residual Error Sum of Squares |
| RE | Red-Edge |
| S1 | Sentinel-1 |
| S2 | Sentinel-2 |
| SAR | Radar de Abertura Síntetica |
| SAR-C | Radar de Abertura Sintética na Banda C |
| SAVI | Índice de Vegetação Ajustado ao Solo |
| SLC | Single Look Complex |
| SR | Relação Simples |
| SWIR | Infravermelho de Ondas Curtas |
| S2REP | Índice Sentinel-2 Posicionado no Red-Edge |
| TOC-VCPN | Analisador de Carbono Orgânico Total |
| TOA | Reflectância Ortorretificada no Topo da Atmosfera |
| UA | Unidade Animal |
| VIF | Fator Inflacionário da Variação |
| VV | Vertical Vertical |
| VH | Vertical Horizontal |
| °C | Graus Celsius |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 2 | OBJETIVOS | 20 |
| 2.1 | Geral | 20 |
| 2.2 | Específicos | 20 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 21 |
| 3.1 | Floresta Tropical Sazonalmente Seca – Caatinga | 21 |
| 3.2 | Produção de biomassa e estoque de carbono na Caatinga | 24 |
| 3.3 | Uso de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da biomassa e estoque de carbono | 26 |
| 3.4 | Sensor multiespectral MSI do satélite Sentinel-2 | 32 |
| 3.5 | Sensor radar SAR-C do satélite Sentinel-1 | 38 |
| 4 | METODOLOGIA | 43 |
| 4.1 | Área de estudo | 43 |
| 4.2 | Amostragem e coleta de dados de campo | 44 |
| 4.3 | Processamento dos dados de sensoriamento remoto | 49 |
| 4.4 | Modelagem da biomassa acima do solo e do estoque de carbono | 52 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 56 |
| 5.1 | Fitossociologia e caracterização sucessional em fragmento de Floresta Tropical Sazonalmente Seca | 56 |
| 5.2 | Estimativa da biomassa acima do solo e do estoque de carbono em campo | 63 |
| 5.2.1 | <i>Componente lenhoso</i> | 63 |
| 5.2.2 | <i>Componente herbáceo</i> | 66 |
| 5.3 | Biomassa medida em campo e as imagens dos satélites Sentinel | 68 |
| 5.3.1 | <i>Polarizações derivadas do Sentinel-1 (SAR)</i> | 68 |
| 5.3.2 | <i>Bandas individuais do sensor multiespectral Sentinel-2</i> | 71 |
| 5.3.3 | <i>Análise multivariada dos dados de sensoriamento remoto e de campo</i> | 75 |
| 5.4 | Modelagem da biomassa | 80 |
| 5.5 | Mapeamento da biomassa | 88 |
| 6 | CONCLUSÕES | 94 |
| | REFERÊNCIAS | 96 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de biomassa resultante dos processos de respiração e fotossíntese fornece bens e serviços que vão desde o suprimento de matérias-primas até a regulação climática, se caracterizando como um recurso natural vital e imprescindível para a humanidade. Desse modo, a sua quantificação e o conhecimento de sua dinâmica espaço-temporal são necessários para o melhor planejamento e gestão do seu uso.

Os reservatórios de biomassa e carbono florestal variam de acordo com o compartimento estudado, podem ser: biomassa acima do solo; biomassa abaixo do solo; serrapilheira; necromassa; e carbono do solo (BIRDSEY, 2006; QURESHI *et al.*, 2012).

Yue *et al.* (2017) consideram que o compartimento da biomassa acima do solo, objeto de estudo dessa pesquisa, inclui troncos, galhos, copa, sementes e folhas e reflete o estado de crescimento da vegetação, relacionada com a utilização da energia solar, rendimento e qualidade da produção. Esses autores ressaltam ainda que a biomassa acima do solo apresenta maior interação com a radiação eletromagnética e é considerada um dos mais importantes parâmetros das florestas. A estimativa da produção de biomassa acima do solo também é importante para a investigação ecológica em escalas regionais e globais e tem sido empregada em estudos sobre o ciclo global do carbono e as alterações climáticas.

Nas Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS), como a Caatinga, ainda são realizados poucos estudos com abordagem biogeoquímica. Historicamente, grande parte da terra coberta por esse tipo de vegetação foi desmatada para agricultura ou outros usos que associados à ocorrência de secas e ao crescimento populacional tem resultado em mudanças consideráveis na vegetação, na perda da produção primária líquida e do carbono do solo (GLENN *et al.*, 2016). Nesse sentido, a quantificação do estoque de carbono e biomassa em FTSS maduras e em regeneração é importante para a construção de orçamentos globais de carbono e para o desenvolvimento de políticas locais e ferramentas de gerenciamento destinadas a sequestrar e armazenar carbono (BECKNELL *et al.*, 2012).

A estimativa de biomassa do componente lenhoso, que compreende os estratos arbustivo e arbóreo da vegetação da Caatinga apresenta grande relevância em termos de produção de energia (LIMA JÚNIOR, 2014). Para o estrato herbáceo essa quantificação diz respeito ao potencial de produção de pastagem natural para o uso na pecuária, sendo esta uma das principais atividades desenvolvidas nesse bioma (ARAÚJO FILHO, 2013). A soma desses componentes resultando na biomassa total acima do solo se aplica na avaliação da ciclagem de nutrientes e do sequestro de carbono (VIRGENS *et al.*, 2017). Essas diferentes finalidades

sugerem que os estudos nesse âmbito sejam realizados de forma compartimentada, de modo a melhorar a exatidão das estimativas realizadas.

A biomassa pode ser medida a partir de métodos diretos que incluem a amostragem destrutiva da vegetação. Esses métodos oferecem medições reais da quantidade de biomassa, no entanto são demorados e de alto custo, inviabilizando-se para aplicações em grandes áreas e em florestas protegidas (SCURLOCK; PRINCE, 1993; QURESHI *et al.*, 2012; HIGA *et al.*, 2014). Para áreas extensas, o uso de sensoriamento remoto é uma realidade cada vez mais próxima por seu formato digital que permite o processamento rápido de grandes quantidades de dados e as altas correlações entre as bandas dos sensores e os parâmetros de vegetação. Esta tecnologia é uma das mais utilizadas para a estimativa da biomassa acima do solo de grandes áreas (LU, 2006; AHAMED *et al.*, 2011), bem como apresenta um custo relativo inferior, dependendo da fonte utilizada, associado a outras vantagens como a repetitividade da coleta de dados e o fornecimento de uma visão sinótica.

Diversos satélites e sensores têm sido utilizados para estimativa da biomassa acima do solo, entre eles destaca-se o sensor multiespectral - *MultiSpectral Instrument* (MSI), a bordo dos satélites da missão Sentinel-2, que apresentam grande potencial de aplicação em estudos de biomassa, devido à alta resolução espacial com pixels de até 10 m que permitem melhor análise de florestas heterogêneas. Além da alta resolução espectral fornecida pelas 13 bandas do satélite, possibilitando maior distinção dos alvos, principalmente em FTSS, cuja vegetação esparsa e sem folhas no período do estio pode facilmente ser confundida com o solo (BATTUDE *et al.*, 2016; PANDIT *et al.*, 2018). Por outro lado, os dados do radar de abertura sintética (SAR) na banda C dos satélites da missão Sentinel-1 são capazes de responder bem às variações estruturais da vegetação, que está diretamente relacionada à quantidade de biomassa. Isso porque o radar opera em polarização única e dupla possibilitando conhecer a forma dos objetos na superfície terrestre (MCNAIRN; SHANG, 2016).

Raros são os registros na literatura para a obtenção da biomassa acima do solo e estoque de carbono, principalmente em FTSS, como a Caatinga, a partir dos dados dos instrumentos multiespectrais (MSI) e radar (SAR-C) recém-lançados a bordo das missões Sentinel-2 e Sentinel-1, respectivamente. Portanto, estudos pioneiros são necessários para avaliar as aplicabilidades desses dados em ecossistemas específicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o estoque de carbono e a biomassa acima do solo nos diferentes estratos do bioma Caatinga a partir de dados de sensoriamento remoto e dados obtidos em campo.

2.2 Específicos

- Analisar os parâmetros fitossociológicos da vegetação em relação a quantidade de biomassa em FTSS;
- Mensurar no campo a biomassa acima do solo e o estoque de carbono em FTSS;
- Compreender a relação entre as bandas espectrais das imagens do sensor MSI/Sentinel-2 e as decomposições polarimétricas derivadas do radar SAR-C/Sentinel-1 com os parâmetros biofísicos da vegetação;
- Gerar e validar modelos de regressão para obtenção do estoque de carbono e biomassa acima do solo nos diferentes estratos da Caatinga por meio de sensoriamento remoto; e
- Analisar a distribuição espacial do estoque de carbono e da biomassa acima do solo nos diferentes contextos de uso do solo e condições naturais em FTSS.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Floresta Tropical Sazonalmente Seca – Caatinga

A Caatinga é um domínio morfoclimático típico de Florestas Tropicais Sazonalmente Secas - FTSS que são definidas como florestas tropicais com precipitação média anual entre 250 e 2.000 mm, cuja evapotranspiração potencial anual excede a precipitação e apresenta forte estação seca com duração de pelo menos três a quatro meses (MURPHY; LUGO, 1986).

As FTSS, como a Caatinga, apresentam uma grande heterogeneidade de microambientes que resultam numa alta complexidade e diversidade biológica (MURPHY e LUGO, 1986). As terras secas cobrem mais de 40% da superfície da Terra, fornecendo serviços ecossistêmicos para um terço da população mundial (MEA, 2005). Esses serviços estão principalmente relacionados à disponibilidade de água e solo. No entanto, a seca e o crescimento populacional, juntamente com o uso intensificado da terra, podem resultar na desertificação e causar mudanças consideráveis na vegetação e na perda da produção primária líquida e do carbono do solo (GLENN *et al.*, 2016).

O domínio das Caatingas apresenta diversas tipologias florestais essencialmente xerófilas, manifestando-se como produtos da evolução, resultando em adaptações e mecanismos de resistência ou tolerância às adversidades climáticas características do regime de semi-aridez (PEREIRA *et al.*, 2001). Nesse sentido, o xerofilismo expressa uma condição de sobrevivência ligada a um ambiente seco, ecologicamente com deficiência hídrica, onde a água disponível para as plantas provém unicamente do curto período da estação chuvosa, pois os solos predominantemente rasos são incapazes de acumular água. Tais condições ambientais propiciaram a seleção de uma vegetação característica, cujos elementos florísticos expressam uma morfologia, uma anatomia e um mecanismo fisiológico conveniente para resistir ao ambiente xérico, de maior ou menor grau de intensidade conforme as condições que prevalecem (FERNANDES, 2006).

A heterogeneidade característica desse bioma manifesta-se principalmente no que se refere à sua fitofisionomia e estrutura. A vegetação da Caatinga apresenta um padrão xerofítico de distribuição irregular, particularizada por ser uma vegetação xérica, garranchenta, por vezes com plantas espinhosas, suculentas ou afilas, com acentuado aspecto tropofítico, dada sua caducifolia no estio, e variando entre o padrão arbóreo e arbustivo, sempre com um manto herbáceo. Tais atributos estão intimamente relacionados às condições climáticas do ambiente

semiárido, a irregularidade das chuvas e a má distribuição das precipitações, com consequências no baixo índice de umidade da atmosfera e na secura pedológica (FERNANDES, 2006).

Em termos de variações fisionômicas e de estrutura, as principais classes de Caatingas consideradas pelos estudiosos são definidas de acordo com o porte da vegetação, sendo elas: Caatinga arbustiva e Caatinga arbórea (LUETZELBURG, 1922; DUCKE, 1959). A Caatinga arbórea apresenta padrão florestal, sendo considerada a verdadeira Caatinga e por vários autores, ainda descrita como Caatinga alta, composta por três estratos: um arbóreo com representantes de 8-12 m de altura, outro arbustivo/sub-arbustivo com indivíduos de 2-5 m e finalmente um herbáceo com altura inferior à 2 m, geralmente de caráter anual com efêmero. Já a Caatinga arbustiva apresenta o padrão mais generalizado, também conhecida como Caatinga baixa e estruturalmente compõe-se de dois estratos: um com indivíduos de 3 a 5 m de altura, havendo raros exemplares arbóreos e outro de porte mais reduzido de natureza herbácea. Podendo ainda apresentar-se sob dois padrões: um denso e outro aberto (FERNANDES, 2006).

Estudos apresentam uma nova classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da Caatinga, considerando quatro níveis categóricos: tipo, que separa a vegetação natural da vegetação cultivada; grupo, relacionado ao porte dominante da vegetação, sendo identificados como arbóreo (> 4,5 m de altura); subarbóreo (> 3 m e < 4,5 m); arbustivo (> 1,5 m e < 3 m) e subarbustivo ou herbáceo (< 1,5 m); classe, que separam as comunidades vegetacionais de diferentes feições morfológicas; e sub-classe que representa a cobertura vegetal, em termos de percentagem de recobrimento da superfície do solo (CHAVES *et al.*, 2008). A estratificação vertical típica da vegetação da Caatinga pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Estratos da vegetação do bioma Caatinga.



Fonte: Autora

A biomassa das árvores que compõe os estratos arbóreo, subarbóreo e arbustivo da Caatinga apresenta grande relevância em termos de produção de energia. Apesar do uso intensivo da lenha da Caatinga, há poucas informações sobre as quantidades de biomassa que são retiradas e sobre o funcionamento de seu ciclo de renovação (LIMA JÚNIOR, 2014). Além de conhecer o potencial da madeira para fins energéticos, as estimativas da biomassa podem ser empregadas para outros diversos propósitos, como na avaliação da ciclagem de nutrientes e do sequestro de carbono (VIRGENS *et al.*, 2017).

O estrato herbáceo, no entanto, apresenta sua importância relativa no que diz respeito ao potencial de produção de pastagem natural para o uso na pecuária, sendo esta uma das principais atividades desenvolvidas no bioma Caatinga, apesar da baixa capacidade de suporte desse ambiente (ARAÚJO FILHO, 2013). Contudo, práticas de manejo, como o raleamento, tendem a aumentar a produção de biomassa desse estrato e consequentemente a capacidade de suporte (CONRADO, 2017). Além disso, pode promover uma maior proteção do solo contra os processos erosivos devido ao aumento da rugosidade da superfície do solo provocada pelo manto herbáceo (SANTOS, *et al.*, 2014).

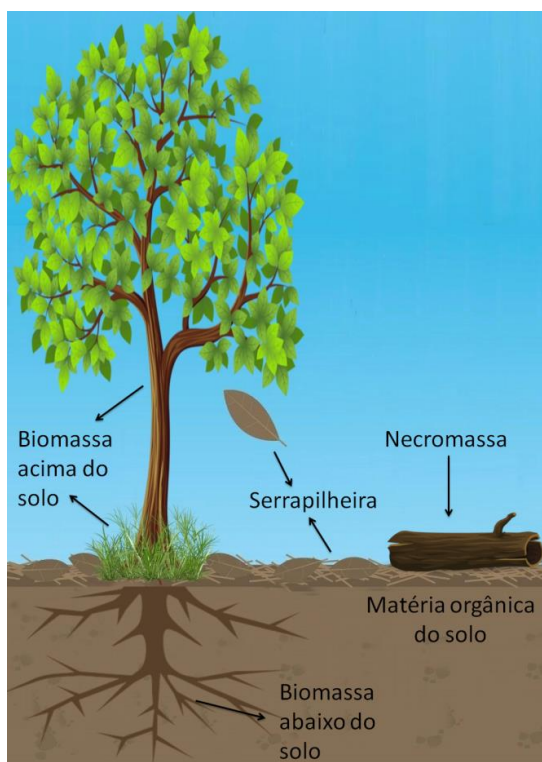
3.2 Produção de biomassa e estoque de carbono na Caatinga

O carbono se constitui como um dos elementos essenciais à vida, se caracterizando por participar da composição química de todos os componentes orgânicos como fonte de energia. Em seu ciclo, o dióxido de carbono (CO₂) e o vapor de água na presença de luz solar são absorvidos pelas plantas por meio da fotossíntese para a produção de oxigênio e compostos de carbono nas diversas partes de uma planta, aumentando a quantidade de biomassa. Essa, por sua vez, é o resultado da diferença entre a produção da fotossíntese e o consumo pela respiração. E ao multiplicar a biomassa pelo teor de carbono na planta obtém-se o estoque de carbono (BROW, 1997; KLASS, 1998; NAKAI, 2016).

Contudo, a biomassa é definida por diversos autores como sendo qualquer material derivado da vida vegetal que seja renovável (KLASS, 1998). Tal definição exclui recursos energéticos como petróleo, carvão mineral e xistos betuminosos que apesar de serem derivados da vida vegetal não são renováveis.

Nesse sentido, a biomassa vegetal é o peso do material vegetal contido acima e abaixo de uma unidade de área da superfície do solo em um determinado ponto no tempo (ROBERTS *et al.*, 1993). Acerca dos reservatórios de carbono que implicam na quantificação da biomassa florestal, podem ser definidos os seguintes compartimentos: biomassa acima do solo, que inclui troncos, galhos, copa, sementes e folhas das plantas vivas e é o objeto de estudo desta pesquisa; biomassa abaixo do solo, designada pelas raízes das plantas vivas com diâmetro superior a 2 mm; serrapilheira, que inclui toda biomassa morta acima do solo, inclusive madeira com diâmetro inferior a 2 cm; necromassa, caracterizada pela biomassa lenhosa morta; e a matéria orgânica do solo (Figura 2) (BIRDSEY, 2006; QURESHI *et al.*, 2012).

Figura 2 – Reservatórios de carbono que implicam na quantificação da biomassa florestal.



Fonte: Autora

O teor de carbono em cada compartimento varia com o tipo de vegetação, estrutura e condição do local (ROY; RAVAN, 1996). Na Caatinga, o maior compartimento diz respeito à biomassa acima do solo, referente ao componente arbustivo-arbóreo e herbáceo da vegetação, seguido da biomassa abaixo do solo e da serrapilheira (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016).

A concentração de carbono na biomassa de florestas tropicais está entre 46% e 52%, geralmente os estudos consideram 50% de carbono na biomassa conforme recomendações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2007) (HIGUCHI; CARVALHO JÚNIOR, 1995; BROWN, 1997; HIGUCHI *et al.*, 2004, SAATCHI *et al.*, 2011). Para a Floresta Tropical Sazonalmente Seca em estudo, a Caatinga, foram encontrados valores pouco inferiores aos descritos acima, da ordem de 44,5% (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016).

Das partes constituintes da biomassa acima do solo, estudos demonstraram que na Caatinga, assim como na maioria dos ecossistemas florestais, a maior contribuição é proveniente do fuste, representado pela parte principal do tronco das árvores, seguida dos galhos e finalmente das folhas (VIRGENS, *et al.*, 2017). Contudo, outra pesquisa em ambiente semelhante identificou o compartimento dos galhos como sendo maior que o do fuste (ALVES, 2012). Essa divergência pode ser justificada pelo estágio sucessional da floresta que promove variação das espécies quanto ao acúmulo e distribuição da biomassa, número de perfilhos ou

ainda a grande variação sazonal verificada nesse tipo de ambiente (LIMA JÚNIOR, 2014; PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016).

Nas FTSS, a variação mensal da produtividade primária é fortemente influenciada pela distribuição das precipitações pluviométricas, de modo que no período chuvoso uma maior quantidade de carbono é incorporada a biomassa vegetal, isso porque as árvores caducifólias são um componente dominante desse tipo de floresta e duração do período sem folhas está correlacionada com a não ocorrência de chuvas (BECKNELL *et al.*, 2012; MORAIS, 2017). Nesses ecossistemas, a precipitação média anual explica mais de 50% da variação da biomassa acima do solo, tornando-se a variável climática que mais afeta esse parâmetro da vegetação, embora haja outros fatores como, história de vida e disponibilidade de luz e nutrientes (BECKNELL *et al.*, 2012).

A biomassa acima do solo nas FTSS secundárias, aquelas em que houve supressão da vegetação, se recupera a uma taxa rápida, alcançando a biomassa máxima em aproximadamente 3 a 5 décadas. Essas taxas rápidas de recuperação após perturbações são atribuídas a uma combinação de fatores, incluindo sua estrutura relativamente simples, comparada a Florestas Tropicais Úmidas, a predominância de sementes dispersas pelo vento e o grande número de árvores que podem rebrotar após perturbação (BECKNELL *et al.*, 2012).

3.3 Uso de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da biomassa e estoque de carbono

As medições de carbono e biomassa apresentam de modo geral duas alternativas principais, são elas: amostragem direta e destrutiva na qual há a derrubada da vegetação; ou indireta, por meio de equações alométricas (CERQUEIRA; ROCHA, 2007; SILVEIRA *et al.*, 2008). No entanto, com o desenvolvimento das técnicas de sensoriamento remoto estas também passaram a ser consideradas um método de mensuração e muitos autores afirmam que as duas abordagens básicas para a estimativa da biomassa florestal são: a partir de métodos tradicionais baseados em medições de campo, que incluem tanto a amostragem destrutiva, como as equações alométricas e conversão de volume para biomassa; e métodos de sensoriamento remoto (LU, 2006; PANDIT *et al.*, 2018).

O método direto baseado na amostragem destrutiva da vegetação implica na medida real da biomassa, efetuada, por exemplo, por meio da pesagem do fuste inteiro da árvore, na colheita e divisão da massa de cada componente constituinte (caule, galhos, folhas, flores, frutos e raízes) e posteriormente determinar analiticamente a biomassa e teor de carbono dos vários

componentes. Contudo, esses métodos não são aplicáveis em grandes áreas devido à necessidade logística e a amostragem destrutiva em florestas naturais em qualquer estágio sucessional requer autorizações específicas expedidas pelo órgão ambiental (SCURLOCK; PRINCE, 1993; QURESHI *et al.*, 2012; HIGA *et al.*, 2014). Além disso, é um método demorado, laborioso e difícil de implementar em áreas pouco acessíveis de modo que as amostras são frequentemente sub-representadas em áreas de topografia complexa, condições climáticas variáveis, significância cultural ou restrição política (LU, 2006; KAURANNE, 2017; STOVALL, 2017; PANDIT *et al.*, 2018).

Apesar de ser reconhecido como o de maior precisão, o método destrutivo tem sua aplicação restrita a estudos específicos e para a obtenção de bons métodos indiretos, como os baseados em sensoriamento remoto e as equações alométricas (QURESHI *et al.*, 2012; HIGA *et al.*, 2014). Neste último caso, a biomassa pode ser inferida por meio da extrapolação de dados obtidos em nível de parcela que se relacionam ao teor de carbono e a biomassa da floresta. Esses dados são referentes a variáveis estruturais de fácil obtenção, como: diâmetro, altura e densidade da madeira (BROWN, 1997).

Equações alométricas robustas podem melhorar as estimativas de biomassa, no entanto, a amostragem destrutiva para a medição de uma única árvore, necessária para o desenvolvimento das equações, é dispendiosa, desafiadora e propensa a erros de medição (STOVALL, 2017). Nesse sentido, a conversão do diâmetro e altura da árvore em biomassa usando equações alométricas é incerta, baseando-se na capacidade de uma equação individual em capturar variações, não apenas por espécie e forma de crescimento, mas também espacialmente, dependendo do clima, solo, disponibilidade de nutrientes e competição (FELDPAUSCH *et al.*, 2011).

A incerteza na distribuição da biomassa seria substancialmente reduzida, aumentando-se o tamanho da amostra para obtenção das equações alométricas para capturar a variabilidade na forma das árvores em toda a paisagem. No entanto, coletar grandes exemplares por meio da amostragem destrutiva envolvendo o corte e pesagem de árvores é um processo demorado e dispendioso, sujeito a um viés de amostral e alta incerteza (CHAVE *et al.*, 2004; PICARD *et al.*, 2012). Apesar das dificuldades, equações alométricas foram desenvolvidas para muitas espécies de plantas em diferentes biomas, tanto temperados, como tropicais, inclusive para o bioma Caatinga (SAMPAIO; SILVA, 2005).

As estimativas de produção fotossintética, biomassa e estoque de carbono, em grandes áreas de ecossistemas naturais também podem ser obtidas a partir de dados de sensoriamento remoto combinados com medições de campo que resultam em uma abordagem

custo-efetiva bastante vantajosa (SCURLOCK; PRINCE, 1993; KAURANNE, 2017). Os dados de sensoriamento remoto tornaram-se a principal fonte de estimativa de biomassa, porém continua sendo uma tarefa desafiadora, especialmente naquelas áreas de estudo com estruturas complexas de florestas e condições ambientais específicas (LU, 2006).

O sensoriamento remoto se refere à aquisição de informação sobre alguma propriedade de um objeto ou fenômeno sem contato físico com ele. A informação sobre o alvo é então obtida pela detecção e medida de mudanças que o objeto impõe sobre o meio circundante, seja ele eletromagnético, acústico ou potencial (SIMONETTI; ULABY, 1983). Uma abordagem mais restritiva define sensoriamento remoto como o conjunto de atividades utilizadas para a aquisição de informações relativas aos recursos naturais da Terra, ou ao seu ambiente, obtidas pela análise da energia eletromagnética refletida, emitida ou retroespalhada pelos alvos, coletadas por meio de sensores instalados a bordo de plataformas terrestres, aéreas (balões e aeronaves) e orbitais (satélites artificiais) (SLATER, 1980; FLORENZANO, 2011).

Esse método é então caracterizado por ser uma técnica ótica não destrutiva que se baseia no fato de que os objetos da superfície terrestre, como a vegetação, a água e o solo, refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características biofísicas e químicas (SCURLOCK; PRINCE, 1993; FLORENZANO, 2011).

O processo de aquisição de informação sobre um alvo deve levar em consideração os seguintes aspectos: as características da energia que incide sobre o alvo, podendo essa ser proveniente da luz solar, ou de um sensor ativo como um radar e até mesmo da energia emitida pelo próprio alvo, considerando, por exemplo, sua distribuição espectral, intensidade e polarização da radiação; as características do meio em que a energia se propaga, isto é, as propriedades de absorção, espalhamento e emissão; as propriedades do alvo; e as próprias características do sensor (FLORENZANO, 2011; LORENZZETTI, 2015).

Os sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro, e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação (MOREIRA, 2007). As principais características dos sistemas sensores são expressas por quatro domínios de resolução, a saber: espacial, espectral, temporal e radiométrica.

A capacidade que o sensor tem de discriminar objetos em função do tamanho destes é chamada de resolução espacial. Trata-se do campo de visada instantâneo, ou seja, refere-se à área vista por determinado sensor sobre a superfície da Terra dentro de um ângulo sólido em dado instante de tempo, quanto menor for esse ângulo, maior será a resolução espacial do sensor

e conseqüentemente sua capacidade de distinguir os objetos da superfície (MOREIRA, 2007; ASHRAF, *et al.*, 2011; FLORENZANO, 2011).

A resolução espectral é a capacidade que um sensor possui para discriminar objetos em função de sua sensibilidade espectral relacionada tanto ao número como a largura das bandas espectrais no dispositivo de detecção. Quanto mais estreita for à faixa espectral da qual o sensor capta dados, maior é a possibilidade de registrar variações de energia refletida pelo objeto. Da mesma forma, pode-se considerar que quanto maior for o número de bandas de um sensor, maior será sua resolução espectral (ASHRAF, *et al.*, 2011; FLORENZANO, 2011).

Existe também a resolução radiométrica que se refere à capacidade de o sensor discriminar a intensidade de energia refletida ou emitida pelos objetos. Ela determina o intervalo de valores (associado a níveis de cinza) que é possível utilizar para representar uma imagem digital (FLORENZANO, 2011). E a resolução temporal é dada em função das características da plataforma e se refere à frequência de imageamento sobre uma mesma área, ou seja, o tempo que o satélite leva para recobrir novamente a área de interesse (MOREIRA, 2007; ASHRAF, *et al.*, 2011; FLORENZANO, 2011).

Em relação aos métodos de sensoriamento remoto, estes podem ser: baseados em dados de radar e baseados em dados multiespectrais, esses últimos ainda podem ser classificados quanto a sua resolução espacial (LU, 2006). Também podendo ser discriminados quanto a sua resolução espectral em: dados de banda larga multiespectral; e dados de banda estreita hiperespectrais (MARSHALL; THENKABAIL, 2015).

Os dados precisos de alta resolução espacial, como fotografias aéreas e imagens de satélites espaciais, podem fornecer uma estimativa precisa da biomassa em escala local. No entanto, o grande volume de dados e impactos do problema de sombra restringe sua aplicação para grandes áreas (LU, 2006). Os dados de alta resolução são menos afetados pela heterogeneidade espacial do que imagens de média e grossa resolução, mas geralmente requerem mais recursos computacionais e contêm menos bandas espectrais (MARSHALL e THENKABAIL, 2015).

Estudos comparativos, entre os dados derivados dos satélites de alta resolução espacial IKONOS-2 e GeoEye apresentaram maior correlação com a biomassa de culturas agrícolas que os de média ou grossa resolução (MARSHALL; THENKABAIL, 2015). Porém, estudos divergem quanto a isso, afirmando que o aumento da variabilidade espacial obtido com os dados de resolução espacial alta diminui as correlações em comparação com o uso de imagens de resolução mais grosseira, como provenientes dos Landsat 7 ETM+, onde há maior “média” de variabilidade que, muitas vezes, leva a uma maior correlação com variáveis

biofísicas, especialmente em formações vegetacionais heterogêneas altamente variáveis (KROSS, *et al.*, 2015).

Os dados de resolução espacial alta (< 4 m) como os provenientes do IKONOS e do QuickBird, que apresentam somente quatro bandas espectrais, também não são suficientes para prever a biomassa se não estiverem com conjunto com dados de alta resolução espectral disponíveis em sensores como o Hyperion (MARIOTTO, *et al.*, 2013). Nesse sentido, os satélites Rapideye e WorldView-2 se destacam por apresentarem além da alta resolução espacial, bandas no comprimento da borda vermelha (*red-edge*) referente à região de mudança abrupta na refletância da folha entre 680 e 780 nm, devido aos efeitos combinados da forte absorção de clorofila nos comprimentos de onda vermelhos e alta refletância nos comprimentos de onda no infravermelho devido ao espalhamento interno da folha, melhorando substancialmente as estimativas da biomassa (DUBE *et al.*, 2014; KROSS, *et al.*, 2015; MARSHALL; THENKABAIL, 2015; RAMOELO *et al.*, 2015;).

Em relação aos dados de resolução espacial média, estes fornecem um potencial de estimativa biomassa em nível regional, associados a um baixo custo de aquisição, a um tempo de revista frequente e a uma ampla cobertura espacial, mas os pixels misturados e a saturação de dados em florestas com alta quantidade de biomassa são um problema na estimativa em locais com ambientes biofísicos complexos (LU, 2006). Os dados do satélite Landsat 8 OLI, de resolução espacial de 30 metros têm sido amplamente utilizados em estudos para a predição da biomassa, apresentando sempre um bom desempenho operacional associado a facilidade de acesso, além de seu longo período de arquivamento, quando considerados os outros satélites da série (DUBE; MUTANGA, 2015; ZHU; LIU, 2015).

Os dados de resolução espacial grosseira, como AVHRR ou MODIS, cujas resoluções são de 1,1 Km e 250 m, respectivamente, podem fornecer estimativas de biomassa em uma escala nacional ou global, mas ainda não foram extensivamente usados devido à dificuldade de vincular dados de reduzida resolução espacial a medições de campo (LU, 2006). Os dados MODIS apresentaram boa correlação com ecossistemas de pastagens naturais na China, contudo, pesquisadores alertam para que as parcelas em campo sejam homogêneas, pois o problema de mistura no pixel é quase inevitável em dados de baixa resolução espacial (LI, *et al.*, 2013; NAKANO, *et al.*, 2013; ZHAO *et al.*, 2014). Assim como também para o uso de imagens NOAA-AVHRR: estudiosos alertam para diligência necessária na escolha dos locais para a obtenção de dados de campo (SANNIER *et al.*, 2002; KOGAN, *et al.*, 2004).

Uma combinação de dados de sensoriamento remoto em escala múltipla, de resoluções espaciais médias a altas, pode melhorar a precisão das estimativas de biomassa em

escala nacional ou global (LU, 2006). O uso sinérgico de dados MODIS e Landsat 8 OLI melhoram as estimativas, pois tendem a compensar possíveis fragilidades individuais, associando às diferentes resoluções espaciais e temporais (DONG, *et al.*, 2016; ZHANG, *et al.*, 2016). No entanto, a combinação dos dados RapidEye e Landsat 8 OLI não melhorou a estimativa de biomassa em relação ao uso individual desses sensores em um estudo realizado com vegetação do tipo arbustiva (ZANDLER, *et al.*, 2015)

Os sensores multiespectrais citados são sensores passivos que captam dados de mais de uma região do espectro eletromagnético e têm como fonte de radiação o sol, contudo, estão sujeitos a interferência das condições meteorológicas (nuvens e chuva) na obtenção dos dados e obviamente, não captam imagens à noite. Enquanto os sensores do tipo radar são sensores ativos e por produzirem uma fonte de energia própria na região de micro-ondas, podem obter imagens tanto durante o dia como à noite (VAN DER SANDEN, 1997; FLORENZANO, 2011).

O sinal de micro-ondas pode penetrar o dossel da vegetação em diferentes profundidades, dependendo do comprimento de onda, sofrendo retroespalhamento desde os componentes do dossel, em comprimentos de onda menores, até os troncos e o solo, em comprimentos de onda maiores. Esse retroespalhamento caracteriza a interação do pulso de micro-onda com a superfície vegetal (VAN DER SANDEN, 1997). Sua capacidade de medir a biomassa é afetada por outras propriedades do sensor, como a polarização e o ângulo de incidência, e também pela cobertura do solo e propriedades do terreno, ou seja, rugosidade e constante dielétrica (LU, 2006).

A estimativa de biomassa com base em dados de radar tem sido objeto de estudo de muitas pesquisas, indicando o alto potencial desses tipos de dados em retornar os parâmetros da vegetação (CARREIRAS, *et al.*, 2012; BOUVET, *et al.*, 2018). Nas regiões tropicais, os comprimentos de onda mais longos têm se mostrado mais úteis devido a um aumento na gama de retroespalhamento com a mudança da biomassa, pois estas estimativas de biomassa são válidas até um certo limiar onde ocorre a saturação (MITCHARD *et al.*, 2009; PANDEY *et al.*, 2010). Dessa forma, valores baixos de biomassa podem ser melhor estimados com a banda X (menor comprimento de onda), enquanto que a alta biomassa apresenta melhor relação com dados de banda L (maior comprimento de onda), esses últimos, portanto, têm uma penetração mais profunda e são influenciados pela interação com o solo e solo-tronco em valores baixos de biomassa, já o sinal de retroespalhamento da banda X interage principalmente com folhas, galhos e pequenos ramos e a dispersão principal da banda L são de ramos primários e secundários (ENGLHART, *et al.*, 2011).

A tendência atual na estimativa da biomassa acima do solo é o uso combinado dos diferentes tipos de dados derivados do sensoriamento remoto. O uso de respostas espectrais provenientes de dados com diferentes resoluções espaciais e espectrais e texturas de imagem derivadas de dados radar, tem se mostrado útil para melhorar o desempenho das estimativas da biomassa (ZHAO *et al.*, 2016; PHUA *et al.*, 2017).

Portanto, as pesquisas tendem a se concentrar na integração de dados de várias fontes, que incluem o sensoriamento remoto (dados ópticos e de micro-ondas), Sistema de Informação Geográfica e técnicas de modelagem. Os dados detectados remotamente devem abarcar as diferentes resoluções espaciais e espectrais de modo a reduzir as incertezas do uso individual dos dados. Além disso, a necessidade do usuário, as características dos dados detectados remotamente, a escala da área de estudo e a disponibilidade de suporte econômico também têm influências importantes no procedimento de estimativa da biomassa acima do solo (LU, 2006).

3.4 Sensor multiespectral MSI do satélite Sentinel-2.

Um sensor multiespectral é um instrumento que mede principalmente a radiação eletromagnética refletida no domínio óptico. Esse tipo de sensor “escaneia” a superfície da Terra, medindo a energia refletida da área visualizada. Isso é feito simultaneamente para várias faixas de comprimento de onda, ou seja, para várias bandas, em que cada faixa é um intervalo do espectro eletromagnético para o qual a energia refletida média é medida. A razão para medir bandas de comprimentos de onda distintos é que cada banda está relacionada com características específicas da superfície da Terra. Por exemplo, as características de reflexão do azul no comprimento de onda do visível fornecem informações sobre a composição mineral; características de reflexão da na faixa do infravermelho estão relacionadas ao tipo e a saúde da vegetação. A definição das bandas de um sensor multiespectral, portanto, depende das aplicações para as quais o sensor foi projetado (JANSSEN; HUURNEMAN, 2001; FLORENZANO, 2011).

A missão Sentinel-2 faz parte do Programa *Global Monitoring for Environment and Security*, uma iniciativa conjunta da Comissão Europeia e da Agência Espacial Europeia que visa fornecer imagens multiespectrais de alta resolução com alta frequência de revisitação, para garantir a continuidade das imagens multiespectrais fornecidas pela série de satélites SPOT e produzir informações a partir de observações para a próxima geração de produtos operacionais,

contribuindo diretamente para serviços como gerenciamento de terras, inclusive para o setor agrícola (segurança alimentar), silvicultura, controle de desastres e operações de ajuda humanitária (MARTIMORT *et al.*, 2007; DRUSCH *et al.*, 2012; RAMOELO, *et al.*, 2015).

Os satélites que compõem a missão são o Sentinel-2A e o Sentinel-2B, o primeiro lançado em 2015 e o outro em 2017, ambos com órbita heliossíncrona, largura de faixa de 290 km e altitude de 786 km e que, juntos, têm a capacidade de revisita de 5 dias no equador, e de 2 a 3 dias nas latitudes médias e graças a essa frequência de revisita, uma determinada superfície da terra pode ser observada sem nuvens pelo menos uma vez por mês, além disso, os satélites da missão Sentinel-2 cruzam o equador às 10h:30min. do horário local, minimizando a cobertura de nuvens e assegurando a iluminação solar adequada para a obtenção das imagens (MARTIMORT *et al.*, 2007; HAGOLLE *et al.*, 2015).

Ambos os satélites contam com o sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) com 13 bandas espectrais que vão de 430 nm a 2190 nm e cobrem as regiões do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas, com resolução espacial variando de 10 a 60 m, dependendo da faixa espectral, cujas características estão detalhadas na Tabela 1 (DRUSCH *et al.*, 2012; GOMÉZ, 2017).

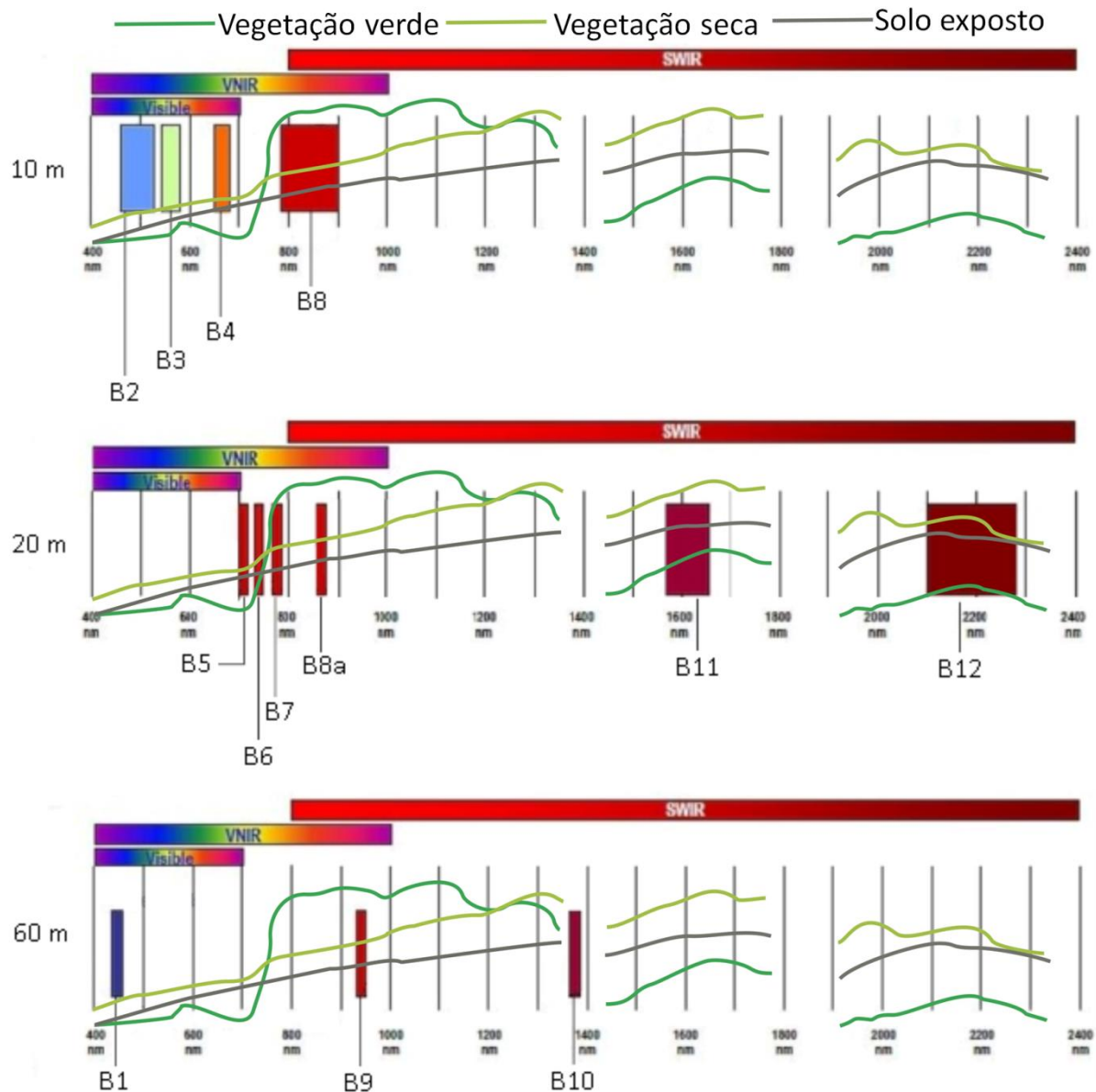
Tabela 1 – Características espectrais e espaciais do sensor MSI/Sentinel-2A e 2B.

| Banda | Nome da banda | Resolução (m) | Sentinel-2A | | Sentinel-2B | |
|-------|-------------------|---------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
| | | | Comprimento de onda central (nm) | Largura (nm) | Comprimento de onda central (nm) | Largura (nm) |
| 1 | Aerossol | 60 | 443,9 | 27 | 442,3 | 45 |
| 2 | Azul | 10 | 496,6 | 98 | 492,1 | 98 |
| 3 | Verde | 10 | 560,0 | 45 | 559,0 | 46 |
| 4 | Vermelho | 10 | 664,5 | 38 | 665,0 | 39 |
| 5 | <i>Red-Edge 1</i> | 20 | 703,9 | 19 | 703,8 | 20 |
| 6 | <i>Red-Edge 2</i> | 20 | 740,2 | 18 | 739,1 | 18 |
| 7 | <i>Red-Edge 3</i> | 20 | 782,5 | 28 | 779,7 | 28 |
| 8A | <i>Red-Edge 4</i> | 20 | 864,8 | 33 | 864,0 | 32 |
| 8 | NIR | 10 | 835,1 | 145 | 833,0 | 133 |
| 9 | Vapor d'água | 60 | 945,0 | 26 | 943,2 | 27 |
| 10 | Cirrus | 60 | 1373,5 | 75 | 1376,9 | 76 |
| 11 | SWIR 1 | 20 | 1613,7 | 143 | 1610,4 | 141 |
| 12 | SWIR 2 | 20 | 2202,4 | 242 | 2185,7 | 238 |

Fonte: Adaptado de DRUSCH *et al.* (2012). Onde: NIR= Infravermelho próximo; SWIR: Infravermelho de ondas Curtas.

As bandas da região do visível (bandas 2, 3 e 4) e do infravermelho próximo (banda 8) tem resolução espacial de 10 m para manter a compatibilidade com os produtos SPOT, enquanto que as bandas de 20 m de resolução (5, 6, 7, 8A, 11 e 12) na região do *red-edge* e infravermelho de ondas curtas (SWIR) foram concebidas para observar principalmente características da vegetação e as bandas com resolução espacial de 60 m (1, 9 e 10) têm como finalidade a correção atmosférica (DRUSCH *et al.*, 2012). A relação entre as bandas e o comportamento espectral da vegetação pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Bandas do sensor MSI/Sentinel-2 e o comportamento espectral de diferentes alvos.



Fonte: Adaptado de ESA (2015) e LI; GUO (2018).

Estudos têm demonstrado o grande potencial da alta resolução espacial e temporal dos dados do instrumento MSI/Sentinel-2, sendo considerado uma alternativa aos dados hiperespectrais que geralmente são inacessíveis, seja pelo custo ou pela própria inexistência destes para a área de interesse (BATTUDE *et al.*, 2016; PANDIT, *et al.*, 2018). A configuração espectral do Sentinel-2 é comparável a alguns satélite comerciais, como o WorldView-2 e o RapidEye, devido a presença de bandas *red-edge*, contudo, ele é ainda mais aprimorado, pois conta também com bandas infravermelhas de ondas curtas (SWIR), considerando que ambas as regiões do espectro são importantes para estudos de vegetação (RAMOELO *et al.*, 2015; PANDIT, *et al.*, 2018).

A primeira banda *red-edge* (703 nm) posicionada no início da porção de alta reflectividade da vegetação é fundamental para estudos de fitopatologia e nutrição das plantas, enquanto que a segunda faixa do *red-edge* (740 nm) é influenciada por efeitos combinados da saúde das plantas e estrutura da vegetação (CHO; SKIDMORE, 2009). Já a faixa espectral em torno dos 1690 nm, onde localiza-se a banda SWIR 1, é bastante relacionada com a lignina, amido, proteína e nitrogênio na planta, sendo importante para estudos em vegetação não-fotossintética, como é o caso da Caatinga no período de estiagem e a banda SWIR 2 está associada principalmente a proteína e ao nitrogênio (CURRAN, 1989).

Dentre os estudos já realizados, Ramoelo *et al.* (2015) obtiveram ótimas correlações entre os dados do MSI/Sentinel-2 e os nutrientes da vegetação gramínea e para o mesmo tipo de vegetação também foram encontradas boas correlações com o teor de carbono (SIBANDA, *et al.*, 2015). Os dados também apresentaram bom desempenho para a classificação de coberturas do solo na Suécia e no mapeamento de uso e ocupação do solo na África Ocidental, em comparação com os dados do sensor OLI/Landsat-8 (GOMÉZ, 2017; FORKUOR, *et al.*, 2018). Da mesma forma, para a biomassa acima do solo em áreas de florestas protegidas no Nepal, considerando que nessas áreas é comum o problema de saturação de dados multiespectrais devido à grande quantidade de biomassa, contudo, os dados do Sentinel-2 foram capazes de superar esse problema devido à alta resolução espacial e às bandas *red-edge* do sensor MSI (PANDIT, *et al.*, 2018).

Os dados do MSI/Sentinel-2 também forneceram resultados satisfatórios para a obtenção da biomassa acima do solo em manguezais nas Filipinas, florestas tropicais localizadas no Planalto Central do Vietnã, florestas boreais no sul da Finlândia, áreas úmidas com vegetação do bioma campestre da África do Sul e florestas tropicais densas na Índia (CASTILLO, *et al.*, 2017; GHOSH; BEHERA, 2018; ASTOLA *et al.*, 2019; DANG, *et al.*, 2019; NAIDOO, *et al.*, 2019;). Assim também para culturas agrícolas como milho e pastagens, tanto plantadas como naturais (BARRACHINA *et al.*, 2015; BATTUDE, *et al.*, 2016; PUNALEKAR, *et al.*, 2018; RAPINEL *et al.*, 2019).

O monitoramento dos parâmetros da vegetação via sensoriamento remoto multiespectral acontece por meio da análise de suas respectivas respostas espectrais. Essas respostas podem ser avaliadas no comprimento de onda específico de cada banda dos satélites ou por combinações dessas bandas. Entre as combinações destacam-se os chamados índices de vegetação espectrais (IVs) (ALMEIDA, 2016).

Os índices de vegetação foram desenvolvidos para compreender as variáveis do dossel da vegetação e servir como base para muitas aplicações de sensoriamento remoto no

manejo da vegetação, pois eles estão correlacionados com várias propriedades biofísicas importantes como a biomassa, o Índice de Área Foliar (IAF) e a nutrição (AHAMED, *et al.*, 2011). Diversos estudos já foram realizados relacionando essas propriedades com os IVs (KROSS, *et al.*, 2014; GLENN, *et al.*, 2016; CASTILLO, *et al.*, 2017; SIBANDA, *et al.*, 2017; DEB, *et al.*, 2017; GAO, *et al.*, 2018; LI; GUO, 2018)

Os IVs mais amplamente utilizados são os índices de vegetação diferenciais, que relacionam à razão entre a refletância do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho, dentre esses, se destaca o índice de razão simples (SR) pioneiro entre os índices, proposto por Jordan (1969) sendo obtido apenas pela razão das bandas descritas anteriormente. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) apresentado por Rouse *et al.* (1973) também é um dos mais antigos e ainda bastante utilizado. Esse índice trata da normalização dos dados espectrais das bandas do infravermelho próximo e do vermelho. Outro índice de vegetação diferencial é o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo), proposto por Huete (1988) que surgiu como alternativa ao NDVI, buscando minimizar o efeito do solo, que é especialmente prejudicial em áreas com dosséis esparsos como a Caatinga.

A senescência foliar, típica da vegetação da Caatinga, aumenta a refletância próxima a 670 e 500 nm dependendo da composição do pigmento. Nesse sentido, Merzlyak *et al.* (1999) propuseram o índice de refletância de senescência de plantas (PRSI), que foi sensível à relação entre a retenção de carotenóides da vegetação e a senescência da clorofila, obtido pela razão entre a diferença das refletâncias nos comprimentos de onda mencionados e a refletância a 750 nm. Hill (2013) adaptou esse índice para o uso com os dados Sentinel-2, obtendo uma relação entre as bandas verde, vermelho e *red-edge 2*.

A vegetação não fotossintética, como a da Caatinga no período do estio, pode ser separada do solo utilizando índices espectrais no comprimento de onda do infravermelho de ondas curtas (SWIR), pois na ausência de folhas, esse tipo de vegetação tem um alto conteúdo de lignina e celulose, apresentando fortes características de absorção nessa região do espectro (LI e GUO, 2018). Nesse sentido, McNairn e Protz (1993) propuseram índices diferenciais obtidos pela razão entre as refletâncias no comprimento de onda do vermelho e do SWIR, que aplicados em estudos anteriores apresentaram boa correlação com a biomassa da vegetação não fotossintética.

Com base na relação entre a refletância espectral das bandas individuais do sensor MSI/Sentinel-2 e o teor de clorofila, o índice de área foliar (IAF) e a concentração foliar de clorofila, Frampton *et al.* (2013) propuseram dois novos métodos para estimar variáveis biofísicas com dados MSI/ Sentinel-2. Primeiro, o Índice de Clorofila *Red-Edge* Invertido

(IRECI) que incorpora as bandas do vermelho, infravermelho, *red-edge* 1 e *red-edge* 2 para estimar o conteúdo de clorofila do dossel. Ao usar a reflectância do *red-edge*, o IRECI não enfatiza fortemente o vermelho, ajudando a evitar problemas de saturação. O segundo é o Sentinel-2 Posicionado no *Red-Edge* (S2REP), que apresenta uma versão da estimativa do *red-edge* usando interpolação linear. O S2REP fornece uma boa caracterização do aumento na reflectância no *red-edge*.

Ainda sobre as bandas posicionadas na região *red-edge* do espectro, também foram propostos índices de vegetação baseados no NDVI, porém substituindo a banda vermelha pelas diferentes bandas *red-edge*, objetivando diminuir o efeito da saturação. O primeiro índice foi proposto por Gitelson e Merzlyak (1994) utilizando a região do espectro correspondente a banda *red-edge* 1. Com o lançamento do Sentinel-2 em 2015 foram desenvolvidos os demais índices utilizando as bandas *red-edge* 2 e 3 (FERNÁNDEZ-MANSO, *et al.*, 2015). A banda *red-edge* 4, no entanto, se encontra dentro do espectro do NIR, distante da região do vermelho não podendo ser utilizada como substituta deste.

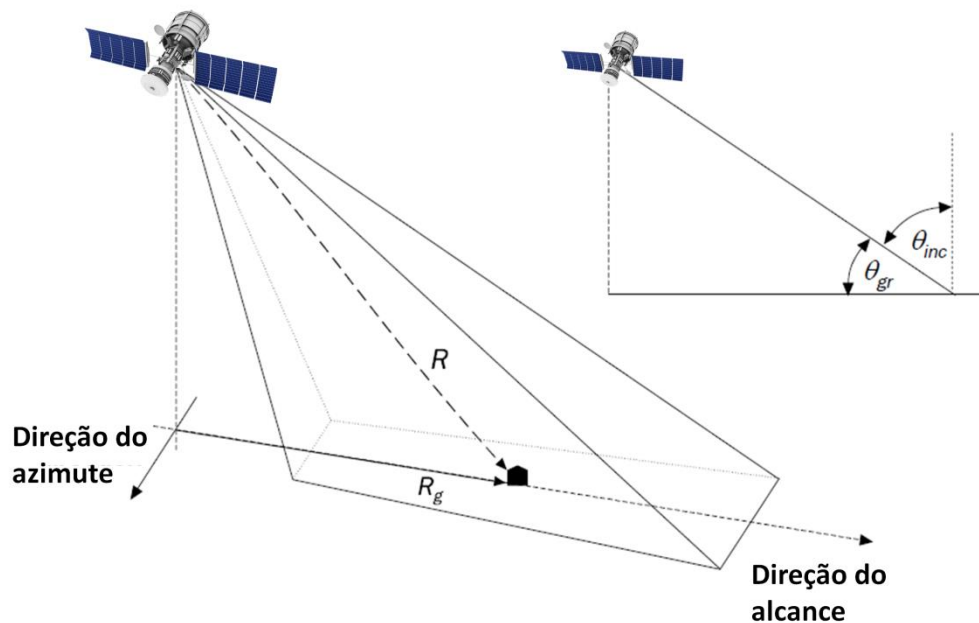
3.5 Sensor radar SAR-C do satélite Sentinel-1

Os sensores do tipo radar operam na região das micro-ondas do espectro eletromagnético e fornecem sua própria radiação, portanto, são referidos aos sistemas ativos. A imagem obtida por um sistema de radar é uma função dos sinais retornados da superfície que recebeu a radiação enviada pela antena desse sistema. O sinal de retorno ou o retroespalhamento varia com os parâmetros do sistema e do alvo, os primeiros se referem ao comprimento de onda ou frequência, polarização, geometria de visada e resolução espacial, enquanto que os parâmetros da superfície observada são rugosidade, umidade, temperatura e ângulos de inclinação e orientação da superfície. Na região de micro-ondas (comprimento de onda superior a 1 mm), a interação da radiação com o alvo depende principalmente das propriedades dielétricas (influenciadas pela umidade) e geométricas (referentes à forma) dos objetos da superfície (VAN DER SANDEN, 1997; FLORENZANO, 2011).

A geometria de medição para um sistema de radar de geração de imagens é ilustrada na Figura 4. Pode ser visto que o feixe de radar está apontando para o lado, em uma direção perpendicular à direção do satélite. Por causa disso, os sistemas de radar de imagem também são conhecidos como sistemas de radar de visão lateral. A figura também traz alguns parâmetros geométricos de um sistema radar comumente usados: direção do azimute (direção do vôo),

direção do alcance (direção perpendicular à linha de vôo), distância do alcance inclinado - R (distância direta do sensor ao objeto), distância do alcance terrestre - R_g (distância do sensor ao objeto projetado no solo), ângulo de incidência - θ_{inc} (ângulo de visão em relação à vertical no ponto do objeto observado) e ângulo de inclinação - θ_{gr} (ângulo de visão em relação à horizontal no ponto do objeto observado) (VAN DER SANDEN, 1997).

Figura 4 – Geometria de medição de um sistema de radar de geração de imagens.



Fonte: Adaptado de VAN DER SANDEN (1997)

O radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*) faz uso de técnicas especiais de registro e processamento de dados que permitem fornecer imagens com resolução espacial alta e constante na direção do azimute. O tamanho final do pixel é definido pela resolução do azimute e a resolução do alcance. A resolução do azimute estabelece que dois objetos no solo com o mesmo alcance inclinado (distância direta do sensor ao objeto) só podem ser detectados separadamente se eles não estiverem ambos dentro do feixe do radar ao mesmo tempo. Para um comprimento de onda específico a resolução de azimute depende inteiramente do comprimento de abertura da antena. Portanto, imagens de alta resolução na direção do azimute exigem a maximização do diâmetro das antenas. No entanto, limitações de engenharia espacial tornam impossível este ajuste mecânico. Para resolver este problema, o efeito Doppler do sinal de eco pode ser usado para sintetizar artificialmente uma abertura de antena muito mais

longa e produzir imagens com maior resolução espacial. Este tipo de procedimento é usado em todos os satélites SAR. Nesses sistemas a resolução azimutal é igual a metade do comprimento da antena e é, portanto, independente da distância entre o sensor e o objeto observado (GOMÉZ, 2017).

As principais características dos sinais de radar são: comprimento de onda, polarização, amplitude e fase. O comprimento de onda é igual a distância entre dois sucessivos ápices da curva senoidal. A amplitude é o desvio máximo da curva e uma indicação de força do sinal eletromagnética. A polarização é determinada pelo plano de vibração do campo elétrico, por exemplo, vertical ou horizontal. A fase representa o desvio do ponto e a direção do movimento. Todos esses parâmetros são especificações técnicas do sistema radar e as ondas refletidas, caracterizadas pelo retroespalhamento (*backscattering*), podem ter uma polarização, amplitude e/ou fase diferentes porque estão sujeitas a alterações resultantes da interação das ondas com os objetos observados, portanto são uma importante fonte de informação para a discriminação de objetos em imagens de radar (JONES; VAUGHAN, 2010).

A resposta registrada por sensores SAR é em grande parte uma função da estrutura e das propriedades dielétricas do alvo. A estrutura de um dossel é diferente entre as culturas e muda à medida que as culturas crescem. Os SARs respondem muito bem a essas diferenças estruturais e, portanto, esses sensores são capazes de identificar com precisão o tipo de cultura e se mostraram sensíveis a vários parâmetros biofísicos como índice de área foliar, biomassa e altura do dossel (MCNAIRN; SHANG, 2016).

O comprimento de onda é importante para caracterizar a propagação de microondas através da atmosfera, porque os comprimentos de onda mais longos são menos susceptíveis a atenuação atmosférica e/ou de dispersão do que os mais curtos. A radiação eletromagnética de micro-ondas usada depende das aplicações de cada missão, mas elas operam principalmente na banda X (2,5 - 3,75 cm), na banda C (3,75 - 7,5 cm) ou na banda L (15 - 30 cm) (VAN DER SANDEN, 1997; GOMÉZ, 2017). Dependendo do comprimento de onda, o sinal de micro-ondas pode penetrar o dossel da vegetação em diferentes profundidades, sofrendo espalhamento desde os componentes do dossel, como os galhos e as folhas, em comprimentos de onda menores, até os troncos e o solo, em comprimentos de onda maiores (VAN DER SANDEN, 1997).

Na avaliação da biomassa é comum a ocorrência de saturação do sinal quando a biomassa do dossel aumenta (IMHOFF, 1995). Nesse sentido, banda C alcança a saturação muito mais rapidamente que a banda L, devido à sua limitada penetração na copa das árvores principalmente em florestas tropicais de grande porte (LU, 2006).

A polarização também desempenha um papel importante na avaliação da biomassa, da produtividade e estresse das culturas, em relação aos demais parâmetros (MCNAIRN; SHANG, 2016). Geralmente as polarizações cruzadas VH (vertical-horizontal) ou HV (horizontal-vertical) apresentam maiores coeficientes de correlação com a biomassa e volume (MITCHARD *et al.*, 2009; PANDEY, *et al.*, 2010; SARAIVA, 2015; CASTILLO, *et al.*, 2017).

O Sentinel-1 é uma missão do Radar de Abertura Sintética (SAR), fornecendo imagens contínuas para todos os climas, dia e noite, na banda C (frequência central de 5,405 GHz), operando em quatro modos exclusivos de imagem com diferentes resoluções e coberturas espaciais. Integrante do Programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), uma iniciativa conjunta da Comissão Europeia (CE) e da Agência Espacial Europeia (ESA). A missão apoia aplicações operacionais nas áreas prioritárias de monitoramento marinho, monitoramento da terra e serviços de gerenciamento de emergência (TORRES, *et al.*, 2012).

A missão é baseada em uma constelação de dois satélites idênticos, Sentinel-1A e Sentinel-1B, o primeiro foi lançado em 3 de abril de 2014 e o segundo em 25 de abril de 2016. Os satélites funcionam na banda C e, em combinação, seu tempo de revisitação global é de seis dias. Os instrumentos SAR de banda C Sentinel-1 suportam operação em polarização única (HH ou VV) e polarização dupla (HH + HV ou VV + VH) com quatro modos de operação: banda larga interferométrica (IW) com uma largura de faixa de 250 km e resolução de pixel de $5 \times 20 \text{ m}^2$, modo de onda (WV) a $20 \times 20 \text{ m}^2$ e resolução de $5 \times 5 \text{ m}^2$, modo mapa (SM) a 80 km largura de faixa e resolução de pixel de $5 \times 5 \text{ m}^2$ e faixa de largura extra (EW) com largura de faixa de 400 km e resolução de pixel de $20 \times 40 \text{ m}^2$ (TORRES, *et al.*, 2012).

Os produtos SAR de cada modo podem ser adquiridos em três níveis de processamento: i) os produtos de nível-0 são dados brutos de SAR compactados e sem foco e são a base a partir da qual produtos de nível superior são produzidos; ii) produtos de dados nível-1 incluem pré-processamento, estimativa centróide Doppler, focalização complexa de aparência única e imagem e pós-processamento para geração dos produtos SLC e GRD, bem como processamento específico de modo para montagem de múltiplos sub produtos. Os produtos de SLC (*Single Look Complex*) de nível-1 consistem em dados de SAR com foco, georreferenciados usando dados de órbita e atitude do satélite e fornecidos em geometria de faixa inclinada e os produtos GRD (*Ground Range Detected*) consistem em dados de SAR focados que foram detectados, com múltiplas aparições e projetados para a faixa de terra usando o modelo de elipsóide terrestre WGS84; iii) e o nível-2 consiste em produtos geofísicos geolocalizados derivados do nível-1 (TORRES, *et al.*, 2012).

Pesquisas anteriores utilizando dos SAR-C/Sentinel-1 mostram que os dados não foram capazes de recuperar satisfatoriamente a biomassa em florestas tropicais com altos valores de biomassa na Índia, assim como também em florestas temperadas de grande porte nos Estados Unidos devido a saturação do sinal (PERIASAMY, 2018; HUANG, *et al.*, 2018)

No entanto, o retroespalhamento do sinal da banda C apresenta uma maior capacidade de retornar a biomassa da vegetação quando esta apresenta valores baixos (PANDEY, *et al.*, 2010). Da mesma forma, Chand e Badrinath (2007) encontraram boa relação entre o retroespalhamento da banda C e os parâmetros da floresta decídua, que geralmente apresentam uma menor quantidade de biomassa. Isso porque a saturação do sinal ocorre na maioria dos casos em valores de biomassa acima do solo em torno de 50 Mg ha⁻¹, embora esse ponto de saturação possa variar de floresta para floresta e dependendo também de fatores como a geometria de visualização do SAR (HUANG, *et al.*, 2018). Logo, os dados SAR-C/Sentinel-1 podem ser aplicados sem prejuízos a tipos vegetacionais como a Caatinga, devido aos valores baixos de biomassa típicos da maior parte desse ambiente.

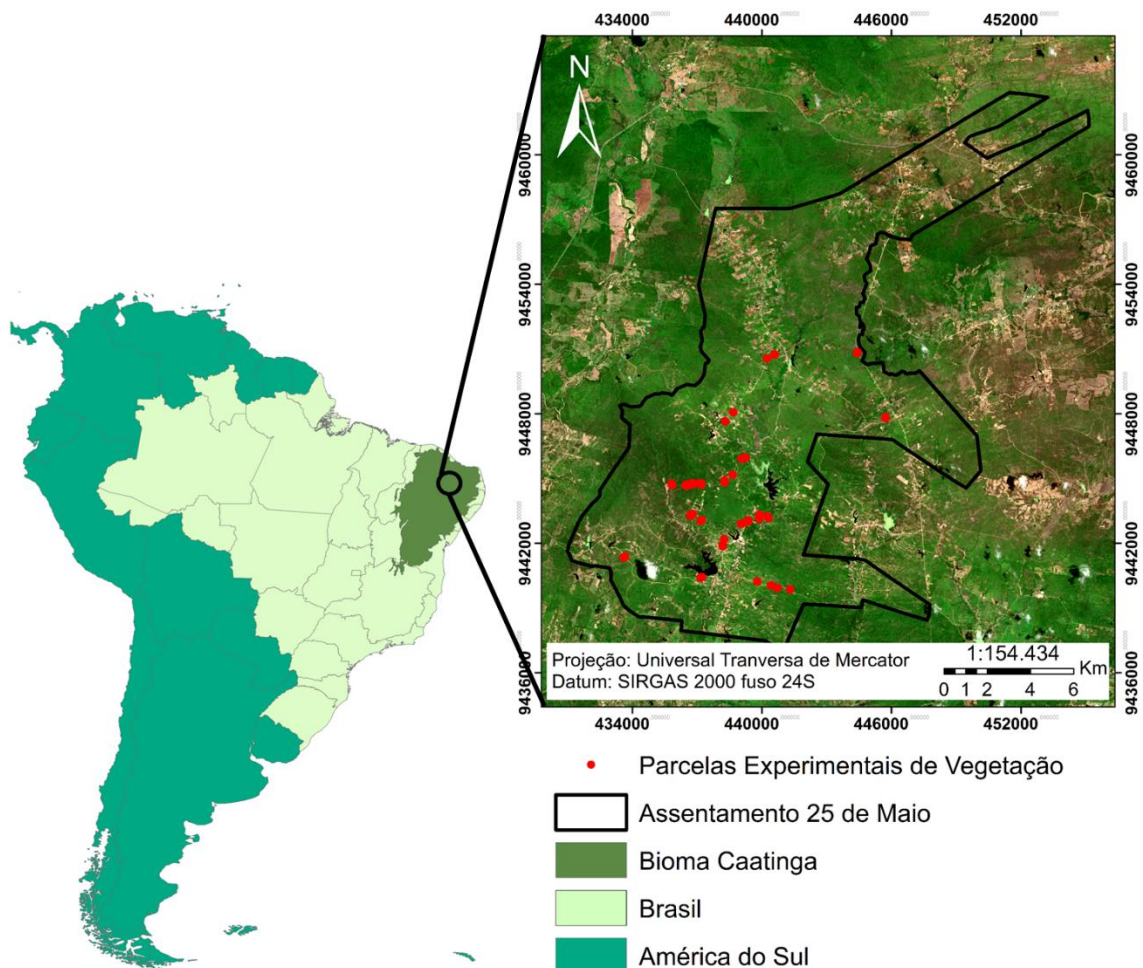
Além disso, apesar dos dados SAR-C/Sentinel-1 em geral apresentarem baixas correlações com a biomassa acima do solo, quando utilizados combinados com outros dados derivados de sensoriamento remoto, sejam dados de radar em outras bandas ou dados multiespectrais, são capazes de melhorar significativamente as estimativas (CASTILLO *et al.*, 2017; PERIASAMY, 2018; LAURIN, *et al.*, 2018; HUANG, *et al.*, 2018). Os parâmetros polarimétricos como um todo, sejam derivados de bandas com comprimentos de onda curtos ou longos devem ser utilizados para melhorar as estimativas de biomassa, pois quando usados isoladamente não apresentam correlações satisfatórias (HUANG, *et al.*, 2018). Outra perspectiva é de que a previsão da biomassa acima do solo a partir de dados SAR-C/Sentinel-1 pode ser melhorada se os modelos forem desenvolvidos por grupos específicos (espécies caducifólias ou perenes) ou tipos de florestas e usando uma maior gama de dados terrestres (LAURIN, *et al.*, 2018).

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no Projeto de Assentamento Federal São Joaquim, mais conhecido como Assentamento 25 de Maio localizado no Sertão Central do estado do Ceará, cuja extensão representa uma área de 22.992 ha e está totalmente inserida na região semiárida, ocupando áreas dos municípios de Quixeramobim, Boa Viagem e Madalena, sendo que esse último representa mais de 90% do território do assentamento (Figura 5). Apresentando clima Tropical Quente Semi-árido, com pluviosidade média de 692 mm ao ano e temperatura entre 26° e 28°C, cujo período chuvoso compreende os meses de janeiro a junho e é recoberto por vegetação típica de Caatinga (IPECE, 2018).

Figura 5 – Localização das parcelas experimentais de vegetação instaladas no território do Assentamento 25 de maio.



Fonte: Autora

O Assentamento 25 de Maio foi o primeiro latifúndio do estado do Ceará a ser ocupado pelo Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST), em 25 de maio de 1989. Na época, aproximadamente 450 famílias vindas de vários municípios do estado do Ceará (Madalena, Quixadá, Quixeramobim, Canindé, Camocim, Ocara, entre outros) ocuparam a Fazenda Unidas São Joaquim. Tal fazenda era propriedade do General Wicar Parente de Paula Pessoa, um dos responsáveis pela grilagem de terras na região (SIMPLÍCIO, 2011).

Em 2010 o Assentamento contava com 586 famílias, com população estimada em 1715 pessoas (). As principais culturas cultivadas pelos agricultores são milho e feijão, produzidos através da agricultura de sequeiro, cuja produção é destinada principalmente para a subsistência. Também há produção pecuária, com rebanhos de bovinos, ovinos e caprinos, alimentados principalmente com a vegetação nativa.

As fisionomias da Caatinga no Assentamento 25 de Maio são bastante diversas, desde áreas com alto grau de preservação, encontradas principalmente nas áreas de reserva legal, e reservas delimitadas pelo INCRA (Instituto de Colonização e Reforma Agrária) durante a desapropriação das terras, até áreas com intensa degradação devido à supressão constante da vegetação para fins de agricultura e pecuária, essas localizadas principalmente nos lotes de cada assentado.

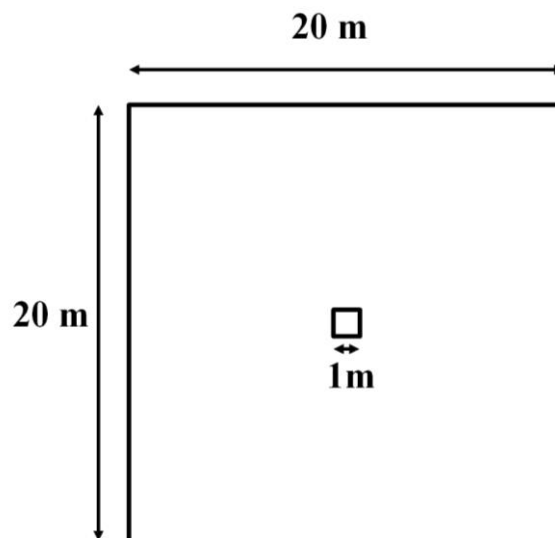
4.2 Amostragem e coleta de dados de campo

Para a quantificação da biomassa e estoque de carbono foram instaladas 50 parcelas aninhadas distribuídas no território do Assentamento 25 de Maio. A escolha dos locais para a instalação foi realizada buscando maior homogeneidade da vegetação dentro de cada parcela e maior diversidade de ambientes entre as parcelas de modo a representar as diversas fisionomias da Caatinga. Para isso, a área foi analisada por meio de imagens de alta resolução espacial dos satélites RapidEye (5 m) e Sentinel-2 (10 m), associadas a visitas de campo.

A instalação de parcelas aninhadas consistiu em adotar áreas de subunidades amostrais menores, conforme o material a ser mensurado. Assim, tipos vegetacionais de ocorrência bastante frequente e com diâmetros menores foram amostradas em subunidades de menor área, enquanto árvores e arbustos com maiores diâmetros e de menor ocorrência foram amostrados em áreas maiores (HIGA *et al.*, 2014). Os tamanhos das parcelas variaram de 1 m² para a medição de pequenos indivíduos do estrato herbáceo até 400 m² para medição dos

indivíduos do estrato lenhoso de grandes dimensões de acordo com o procedimento de Rosa (2018), conforme ilustra a Figura 6. A delimitação da maior parcela foi realizada de acordo com os pixels das imagens do satélite Sentinel-2, cada parcela corresponde exatamente a um pixel de 20 m e quatro pixels de 10 metros de resolução espacial.

Figura 6 – Esquema das parcelas aninhadas para obtenção da biomassa lenhosa e biomassa herbácea.



Fonte: Rosa (2018)

Na sub-parcela central de 1,0 m² posicionada aproximadamente no centro da parcela de 20 x 20 m, foi coletado todo material herbáceo (considerando gramíneas, herbáceas, cactáceas e todos os pequenos arbustos até o limite de inclusão de circunferência na base (CNB) < 9 cm). A coleta foi realizada utilizando tesoura de poda e uma moldura de canos de PVC, cortando os indivíduos dentro da área de interesse rente ao solo (Figura 7). Após a coleta total, foi separada uma sub-amostra representativa do material de cada parcela em sacos de papel de 2 kg com no mínimo 200 g de material.

Figura 7 – Coleta de material herbáceo em campo na sub-parcela de 1 m² no levantamento de dados de campo no Assentamento 25 de maio, Madalena-CE em maio de 2020.



Fonte: Autora

As sub-amostras de material herbáceo foram encaminhadas ao Laboratório de Tecnologia da Biomassa da EMBRAPA Agroindústria Tropical (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), onde foi realizada a determinação de peso seco e do teor de carbono. As mesmas foram secas em estufa de aeração forçada à 65°C até manter peso constante. Após seco, o material foi pesado em balança analítica de precisão e foi determinado seu peso. Em seguida, o material foi moído e peneirado em malha de 100 mesh e armazenado em recipiente hermeticamente fechado e então foram realizadas as análises do teor de carbono nas amostras em um analisador de carbono orgânico total, modelo TOC-VCPN da marca shimadzu® (Figura 8).

O levantamento do estrato herbáceo das parcelas foi realizado somente durante a estação chuvosa, considerando que essa vegetação ocorre apenas nesse período do ano, dos quais 24 parcelas foram mensuradas em maio de 2019 e as outras 26 em maio de 2020. Tal vegetação apresenta grande variação à medida que ocorrem as chuvas, logo para estudá-la é necessário utilizar imagens de satélite o mais próximo possível do dia da coleta.

Figura 8 – Análise do teor de carbono nas amostras do estrato herbáceo da vegetação no analisador de carbono orgânico total TOC-VCPN da marca shimadzu®.



Fonte: Autora

Na parcela de 20 x 20 m (400 m²) estabelecida ao redor da parcela de 1 m² foram mensuradas as seguintes variáveis dos indivíduos lenhosos: CNB (circunferência na base), 0,30 m acima do solo; CAP (circunferência na altura do peito), 1,30 m acima do solo; altura; e espécie (nome vulgar). Cujo limite de inclusão para medição das árvores foi o CNB \geq 9 cm e CAP \geq 6 cm (Figura 9).

Figura 9 – Medição da Circunferência na Altura do Peito – CAP de árvore em parcela experimental no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



Fonte: Autora

A biomassa seca acima do solo do estrato lenhoso foi estimada pela Equação 1, proposta por Sampaio e Silva (2005) que se baseia no DAP (diâmetro do caule na altura do peito), que pode ser obtido a partir do CAP, ao qual foi medido em campo, para todos os indivíduos ocorrentes dentro das parcela, conforme ilustra a Figura 9. Essa equação foi desenvolvida para estimar a biomassa aérea seca de espécies da Caatinga na região semiárida do Brasil, para a qual o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,92. Para árvores multifustes, primeiramente foi calculado o DAP equivalente.

$$\text{Biomassa (Kg)} = 0,1730 \text{ DAP}^{2,295} \quad (1)$$

DAP = diâmetro do caule na altura do peito (cm)

Para o levantamento do componente lenhoso, foram mensuradas as primeiras 24 parcelas em maio de 2019 e as outras 26 no mês de outubro de 2019, considerando que a biomassa lenhosa medida através da equação de Sampaio e Silva (2005) não leva em consideração a presença de folhas na vegetação e que a biomassa de uma árvore somente aumenta à medida que seu caule engrossa e para notar tal diferença é necessário um intervalo de anos. Logo os dados do levantamento realizado podem ser utilizados em estudos com imagens de satélite de ano anteriores e posteriores a coleta.

A obtenção do estoque de carbono foi feita a partir dos valores adquiridos de biomassa do componente lenhoso, que foram multiplicados pelo teor médio de carbono em espécies da Caatinga, de 0,4453, ou seja, do total da biomassa, 44,53% é relativa à quantidade de carbono na vegetação, tal valor foi determinado em estudo anterior a partir de método destrutivo, com coleta de material lenhoso e posterior análise em laboratório (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016). Assim o teor de carbono e a biomassa foram estimados para cada arbusto ou árvore amostrada e para sua obtenção por hectare foram considerados os tamanhos relativos de cada parcela.

Também foi realizado o levantamento fitossociológico e a caracterização sucessional da vegetação tendo em vista o estabelecimento de relações entre esses parâmetros e a estimativa de biomassa por meio do sensoriamento remoto. As diferentes fionomias de Caatinga encontrada em cada parcela do levantamento foram classificadas de acordo com Fernandes (1998) em: Caatinga Arbórea, Caatinga Arbustiva Densa e Caatinga Arbustiva Aberta. E as espécies foram separadas em três grupos ecológicos de espécies segundo as classes de sucessão de Carvalho *et al.* (2012) adaptado de Gandolfi *et al.* (1995): pioneiras, secundárias iniciais e secundárias tardias.

4.3 Processamento dos dados de sensoriamento remoto

Os dados dos instrumentos MSI do satélite Sentinel-2 e SAR-C do Satélite Sentinel-1 foram obtidos gratuitamente por meio do Programa de Observação da Terra da União Europeia – Copernicus, no site <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>.

Para o recobrimento da área de estudo foi necessária somente a cena 24MVV do sensor MSI/Sentinel-2. Nesta mesma cena foram obtidas imagens durante a estação chuvosa (04 maio de 2019 e 22 de junho de 2020) tendo como referencia principal o levantamento da vegetação herbácea das parcelas e na estação seca (31 de outubro de 2019), de modo a avaliar qual a melhor época para quantificar a biomassa lenhosa, além de possibilitar que sua estimativa possa ser feita durante todo o ano, independente da estação, pois modelos gerados com imagens na época chuvosa não podem ser aplicados em imagens na estação seca. A biomassa do manto herbáceo, no entanto somente pode ser mensurada na estação chuvosa pois ela seca e morre durante a época do estio.

As imagens do sensor MSI/Sentinel-2 foram adquiridas no nível de processamento 2A, esse nível inclui uma classificação de cena e uma correção atmosférica pelo método

Sen2Cor aplicada aos produtos de ortoimagem de nível 1C com reflectância ortorretificada no topo da atmosfera (TOA), a imagem nível 2A é então um produto com reflectância corrigida na base da atmosfera (BOA). Com 13 bandas que se estendem através do visível, infravermelho próximo (NIR), borda vermelha (*red-edge*) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), resoluções espaciais de 10, 20 e 60 m e resolução radiométrica de 12 bits por pixel. O processamento das imagens foi realizado no *Software Sentinel Application Platform* (SNAP), para tal foram excluídas somente as bandas 1, 9 e 10, pois estas são utilizadas apenas para detectar características atmosféricas. Além disso, as bandas da borda vermelha (*red-edge*) e as bandas SWIR foram reamostradas para a resolução espacial de 10 m a fim de possibilitar a álgebra de mapas necessária para geração dos índices de vegetação.

Em relação aos dados MSI/Sentinel-2, foram utilizadas as bandas unitárias e índices de vegetação (IV). A seleção dos índices baseou-se no desempenho deles em estudos anteriores. A Tabela 2 mostra todas as variáveis obtidas a partir do sensor MSI/Sentinel-2 que foram utilizadas como dados de entrada para a geração dos modelos, totalizando 20 variáveis.

Tabela 2 – Variáveis a serem obtidas a partir do sensor MSI/Sentinel-2.

| Designação | Bandas do Sentinel-2 | |
|------------|----------------------|--|
| BLUE | B2 | |
| GREEN | B3 | |
| RED | B4 | |
| RE 1 | B5 | |
| RE 2 | B6 | |
| RE 3 | B7 | |
| NIR | B8 | |
| RE 4 | B8a | |
| SWIR 1 | B11 | |
| SWIR 2 | B12 | |

| Índices de Vegetação | Equações | Referências |
|--|---|---------------------------------------|
| NDVI | $NIR - RED / NIR + RED$ | Rouse <i>et al.</i> (1973) |
| SR | NIR / RED | Jordan (1969) |
| SAVI | $(1 + L) * (NIR - RED) / NIR + RED + L$ | Huete (1988) |
| PSRI | $RED - BLUE / RE 2$ | Hill (2013) |
| ND15 | $NIR - SWIR 1 / NIR + SWIR 1$ | McNairn e Protz (1993) |
| IRECI | $NIR - RED / (RE 1 / RE 2)$ | Frampton, <i>et al.</i> (2013) |
| S2REP | $705 + 35 * (((NIR + RED) / 2) - RE 1) / (RE 2 - RE 1)$ | Frampton, <i>et al.</i> (2013) |
| NDVI baseado na borda vermelha (<i>red-edge</i>) | | |
| 1 | $NIR - RE 1 / NIR + RE 1$ | Gitelson e Merzlyak (1994) |
| 2 | $NIR - RE 2 / NIR + RE 2$ | Fernández-Manso, <i>et al.</i> (2015) |
| 3 | $NIR - RE 3 / NIR + RE 3$ | Fernández-Manso, <i>et al.</i> (2015) |

Fonte: Autora. Onde: RE = *red-edge*; NIR = infravermelho próximo; SWIR1= infravermelho de ondas curtas 1; SWIR2= infravermelho de ondas curtas 2; NDVI= Índice de Vegetação da Diferença Normalizada; SR = relação simples; PSRI = índice de refletância de senescência de plantas; SAVI = Índice de Vegetação Ajustado ao Solo; ND15 = Índice de Vegetação da Diferença Normalizada no SWIR 1; IRECI = Índice de Clorofila *Red-Edge* Invertido; S2REP = Sentinel-2 Posicionado no *Red-Edge*.

Em relação aos dados do sensor SAR-C/ Sentinel-1, estes também foram adquiridos paras duas épocas distintas do ano, em maio e outubro de 2019, de modo a avaliar se há variação

no desempenho da mensuração da biomassa lenhosa de acordo com a condição da vegetação (verde ou seca) e possibilitar sua estimativa durante todo o ano. As imagens do radar foram adquiridas no modo IW (*Interferometric Wide Swath Mode*) cujo ângulo incidente varia entre 29° e 47°, com resolução espacial de 5 x 20 m, largura de faixa de 250 km e polarizações VH (transmissão vertical – recepção horizontal) e VV (transmissão vertical – recepção vertical). O nível de processamento dos dados adquiridos foi o nível-1 produzido como GRD (*Ground Range Detected*). Os produtos GRD de nível 1 consistem em dados de SAR focados que foram detectados, com várias aparências e projetados no alcance no solo usando o modelo elipsóide da terra WGS84. A projeção elipsóide dos produtos GRD é corrigida usando a altura do terreno especificada na anotação geral do produto.

O processamento dos dados SAR-C/Sentinel-1 também foi realizado no *Software Sentinel Application Platform* (SNAP) desenvolvido no âmbito do *Water Observation Information System* (WOIS), Projeto TIGER-NET, financiado pela Agência Espacial Europeia. Inicialmente foi realizada a calibração de imagem, que corrige radiometricamente o valor do pixel da imagem de SAR em um que representa o retroespalhamento do sinal do radar da superfície refletora, bem como corrige o efeito do ângulo de incidência e da variação da potência de pulso da réplica. Este processo converte os valores de pixel da imagem SAR em coeficiente de retroespalhamento de intensidade de radar (σ^0). Para tornar o espaçamento do pixel aproximadamente quadrado e minimizar o ruído das imagens foram aplicados os processos de *multilooking* e um filtro de *speckle* Lee refinado. Ainda foi realizada a correção do terreno utilizando o processo *Range-Doppler* para geocodificar as imagens com base no modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Os dados foram então georreferenciados e interpolados para ajustar a resolução. E finalmente, obtidos os coeficientes de retroespalhamento σ^0_{VV} e σ^0_{VH} em decibéis (dB). Essas duas variáveis obtidas do sensor SAR-C/Sentinel-1 com as outras 20 obtidas do sensor MSI/Sentinel-2 formaram um conjunto de 22 variáveis que foram utilizadas como dados de entrada para a geração dos modelos de estimativa da biomassa e estoque de carbono na Caatinga.

4.4 Modelagem da biomassa acima do solo e do estoque de carbono

Os modelos de estimativa de biomassa e estoque de carbono foram desenvolvidos no *software* R versão 3.1.0 a partir de análise de regressão linear múltipla entre os dados obtidos em campo e as variáveis derivadas do sensoriamento remoto. As análises foram realizadas com

(i) apenas variáveis do MSI/Sentinel-2, (ii) apenas variáveis do SAR-C/Sentinel-1 e (iii) combinação das variáveis do MSI/Sentinel-2 e SAR-C/Sentinel-1. A modelagem também foi realizada considerando a estimativa de biomassa e estoque de carbono total e em cada estrato (herbáceo e lenhoso), gerando modelos distintos para cada compartimento.

Inicialmente, foi realizada uma análise da relação entre as refletâncias das bandas das imagens do MSI/Sentinel-2, dos índices de vegetação e dos coeficientes de retroespalhamento do sensor SAR-C/Sentinel-1 com a biomassa dos estratos lenhoso e herbáceo nas diferentes estações do ano. Junto a isso foi feita uma abordagem analítica de fator, por meio da análise fatorial na qual os fatores foram extraídos por componentes principais com rotação pelo método Varimax. Também foram realizados os testes de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de Esfericidade de Bartlett para verificar o ajuste dos dados à análise fatorial.

Para avaliar o potencial das variáveis de sensoriamento remoto obtidas dos satélites Sentinel 1 e 2 na estimativa de biomassa da Caaatinga, foi utilizado o método estatístico de regressão linear múltipla. Para tal, realizou-se o ajuste de modelos de regressão linear de primeira ordem para a predição, com base na seguinte formulação (Equação 2):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad (2)$$

No qual: Y_i é o valor da variável dependente na i -ésima observação; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{p-1}$ são os parâmetros do modelo; $X_{i1}, X_{i2}, X_{i,p-1}$ são os valores das $p-1$ variáveis explicativas (regressores) na i -ésima observação; ε_i é o termo cujo erro aleatório (média zero e variância constante) apresenta média $E\{\varepsilon_i\} = 0$ e variância $\sigma^2\{\varepsilon_i\} = \sigma^2$. Este modelo calcula a predição da variável dependente biomassa (Y), em Megagramas por hectare (Mg ha^{-1}), em função dos dados do sensor multiespectral e do radar (variáveis independentes) extraídos das imagens.

Considerando a grande quantidade de regressores, sabe-se que a execução de um modelo de regressão com muitas variáveis, incluindo as irrelevantes, levará a um modelo desnecessariamente complexo. Diante disso foi utilizado o método *Forward Stepwise* que consiste em iniciar a análise estatística somente com uma constante, sem nenhum dos regressores, e, a cada etapa, após acrescentar uma nova variável, verifica-se a possibilidade de subtrair do modelo aquela variável cuja contribuição parcial não foi considerada significativa, ou seja, a variável permanece no modelo desde que o p -valor da estatística F seja inferior ao α especificado e; ou aumente o valor de R^2 e; ou provoque redução na soma dos quadrados dos resíduos. Porém, variáveis inseridas no modelo em um determinado passo não necessariamente permanecem até o final do processo (se p -valor $> \alpha$). O critério adotado neste estudo para a permanência das variáveis foi de $p < 0,05$.

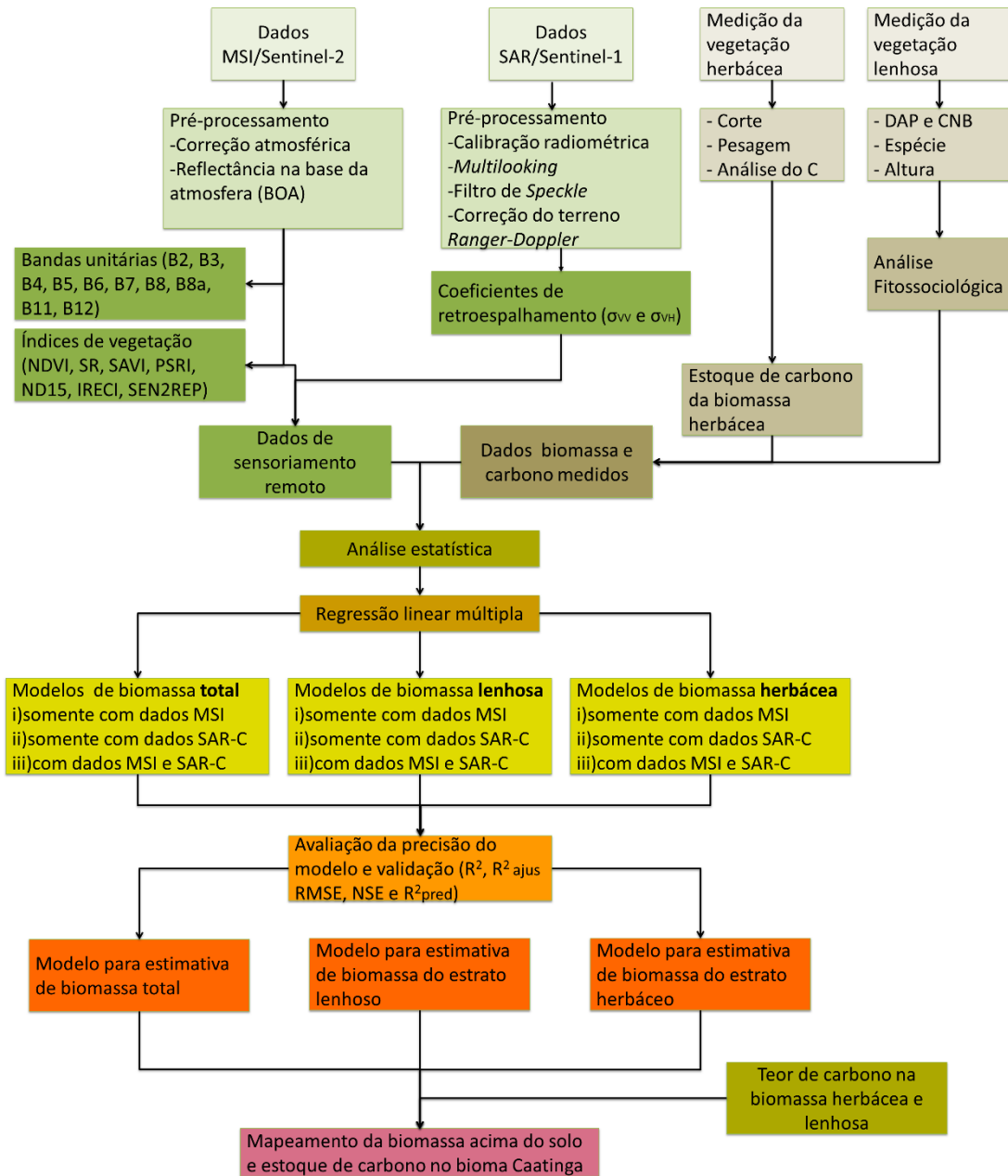
Após a geração dos modelos iniciais pelo método *Forward Stepwise*, tais modelos passaram pelo processo de ajuste, buscando melhorar seu desempenho na estimativa da biomassa. Para tal, foi realizada a análise dos resíduos, a qual adota um conjunto de técnicas para investigar a adequação de um modelo de regressão com base nos resíduos. Também foi avaliado a heterocedasticidade (constância da variância dos resíduos), através do teste de *leverage*, e os *outliers*, por meio da distância de *Cook*.

Além das análises anteriores, também foi verificada a correlação entre as variáveis explicativas do modelo. Se as variáveis forem muito correlacionadas, as inferências baseadas no modelo de regressão podem ser errôneas ou pouco confiáveis. Assim, empregou-se o Fator Inflacionário da Variação (VIF), o qual sugere que valores superiores a 10 indicam que a multicolinearidade pode estar influenciando indevidamente as estimativas dos mínimos quadrados (NETER *et al.*, 1996).

Para validação do modelo, foi utilizado o critério PRESS (*Predicted Residual Error Sum of Squares*), o qual é uma medida que indica quão bom é o modelo de regressão na predição de novos dados. Para o cálculo do PRESS, é excluída a *i*-ésima observação e estimada a função de regressão para os $n - 1$ casos restantes. Neste método, uma das observações é removida da base de dados e o modelo selecionado é ajustado a partir das observações remanescentes. O modelo obtido é então aplicado na predição da observação retirada. Este procedimento é repetido até que valores preditos sejam obtidos para todas as observações (NETER *et al.*, 1996).

Uma vez validado o modelo, este foi aplicado para toda a área de estudo, através do método de álgebra de mapas. Este método inclui cálculos que resultam em grades numéricas e imagens derivadas de operações aritméticas, funções matemáticas, estatísticas, entre outras, comumente aplicadas a dados de natureza quantitativa provenientes de outras grades, bitmaps ou imagens (CÂMARA *et al.*, 1999). Foram empregadas na álgebra de mapas as imagens correspondentes aos atributos pertencentes ao modelo de regressão, resultando nos seguintes mapas para a área de estudo: biomassa e carbono do estrato lenhoso, biomassa e carbono do estrato herbáceo e biomassa total. O resumo das etapas para a obtenção da biomassa e estoque de carbono partir de dados de sensoriamento remoto dos instrumentos MSI/Sentinel-2 e SAR-C/Sentinel-1 é apresentado na forma de fluxograma na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma das etapas para a obtenção da biomassa e estoque de carbono partir de dados de sensoriamento remoto dos instrumentos MSI/Sentinel-2 e SAR-C/ Sentinel-1.



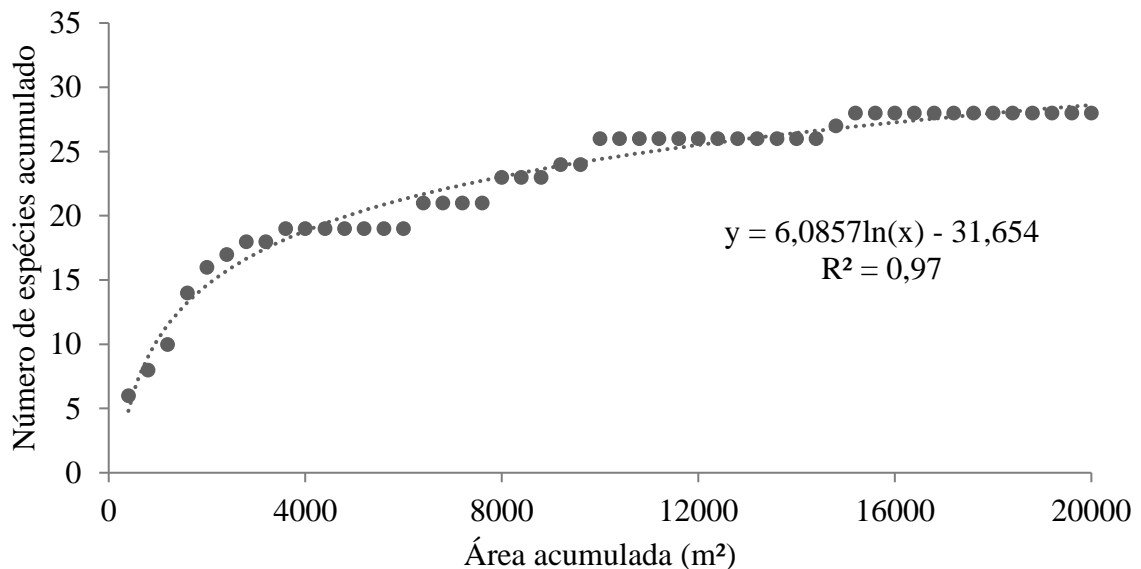
Fonte: Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fitossociologia e caracterização sucessional em fragmento de Floresta Tropical Sazonalmente Seca

A curva espécie-área (Figura 11) indica que a amostragem para a representação da variabilidade florística foi satisfatória, uma vez que se ajusta a uma função logarítmica, com estabilização no acréscimo de novas espécies a partir de 4.000 m² de área amostral com coeficiente de determinação significativo ($R^2=0,97$). Observa-se que a partir de 2.800 m² de área amostrada começou a haver maior redução no número de novas espécies encontradas, sendo que com 4.000 m² de área amostrada, 68% do total de espécies já havia sido identificada. Guedes *et al.* (2012) estudando o componente lenhoso de um trecho de Caatinga no semiárido paraibano também verificaram redução no número de novas espécies a partir de 2.800 m² de área. De modo semelhante, Medeiros *et al.* (2018) identificaram a estabilização da curva aos 2.400 m² para fragmento de Caatinga na Paraíba.

Figura 11 – Curva espécie-área do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



Fonte: Autora

No levantamento realizado, foram amostrados 2.131 indivíduos pertencentes a 13 famílias e 28 espécies. Os valores apresentados para densidade total e área basal total foram, respectivamente, 1.065,5 ind ha⁻¹ e 41,81 m² ha⁻¹. A densidade constatada na área experimental

estudada é inferior aos estudos de Guedes *et al.* (2012), Pereira Júnior *et al.* (2012) e Alves *et al.* (2012), cujos valores encontrados foram de 1.622, 3.495 e 1.600 ind ha⁻¹ na devida ordem, porém ainda superior aos estudos de Medeiros *et al.* (2018) com 950 ind ha⁻¹. No que diz respeito a área basal, em relação aos estudos citados anteriormente, todos apresentarem valores inferiores ao obtido neste levantamento o que releva um alto grau de cobertura florestal na área experimental.

A família Fabaceae foi a que apresentou a maior quantidade de espécies, com 12 representantes, contabilizando 42,8% do total, seguida da família Euphorbiaceae com quatro espécies (Tabela 3). Essas famílias também se destacaram em número de espécies em outros levantamentos realizados na Caatinga, como no estudo de Medeiros, *et al.* (2018), Santos *et al.* (2017) e Guedes *et al.* (2012) corroborando com os dados verificados neste estudo. O total de espécies levantadas encontra-se dentro do intervalo verificado em outros trabalhos realizados no mesmo tipo de vegetação, que variaram de 13 a 37 espécies (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2012; GUEDES *et al.*, 2012; ALVES *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2017; LIMA; COELHO, 2018; MEDEIROS, *et al.*, 2018).

Tabela 3 – Parâmetros fitossociológicos das espécies do estrato lenhoso amostradas em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.

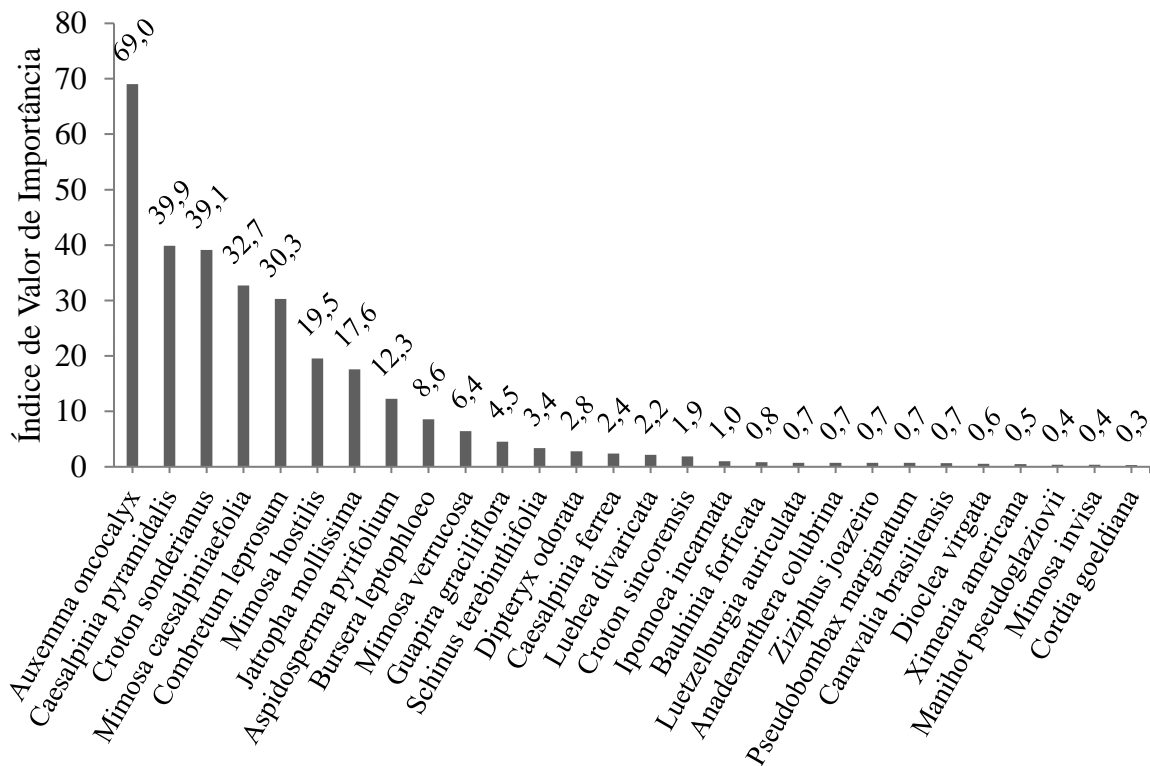
| Família | Espécie | NI | DA | DR | FA | FR | DoA | DoR | GE |
|----------------|---------------------------------|-----|-------|-------|----|-------|------|-------|----|
| Fabaceae | <i>Mimosa caesalpiniaefolia</i> | 255 | 127,5 | 11,97 | 56 | 8,19 | 2,63 | 12,56 | SI |
| | <i>Caesalpinia pyramidalis</i> | 266 | 133 | 12,48 | 86 | 12,57 | 3,09 | 14,8 | SI |
| | <i>Mimosa hostilis</i> | 142 | 71 | 6,66 | 50 | 7,31 | 1,16 | 5,56 | PI |
| | <i>Mimosa verrucosa</i> | 36 | 18 | 1,69 | 30 | 4,39 | 0,07 | 0,35 | ST |
| | <i>Caesalpinia ferrea</i> | 7 | 3,5 | 0,33 | 14 | 2,05 | 0,01 | 0,04 | SI |
| | <i>Dipteryx odorata</i> | 10 | 5 | 0,47 | 10 | 1,46 | 0,18 | 0,87 | ST |
| | <i>Bauhinia forficata</i> | 3 | 1,5 | 0,14 | 4 | 0,58 | 0,02 | 0,1 | SI |
| | <i>Dioclea virgata</i> | 5 | 2,5 | 0,23 | 2 | 0,29 | 0 | 0,02 | SI |
| | <i>Anadenanthera colubrina</i> | 2 | 1 | 0,09 | 4 | 0,58 | 0,01 | 0,04 | ST |
| | <i>Mimosa invisa</i> | 1 | 0,5 | 0,05 | 2 | 0,29 | 0 | 0,02 | PI |
| | <i>Luetzelburgia auriculata</i> | 3 | 1,5 | 0,14 | 4 | 0,58 | 0 | 0,02 | SI |
| | <i>Canavalia brasiliensis</i> | 2 | 1 | 0,09 | 4 | 0,58 | 0 | 0 | SI |
| Euphorbiaceae | <i>Croton sonderianus</i> | 482 | 241 | 22,62 | 90 | 13,16 | 0,7 | 3,34 | PI |
| | <i>Jatropha mollissima</i> | 240 | 120 | 11,26 | 32 | 4,68 | 0,34 | 1,62 | PI |
| | <i>Croton sincorensis</i> | 17 | 8,5 | 0,8 | 6 | 0,88 | 0,04 | 0,19 | PI |
| | <i>Manihot pseudoglaziovii</i> | 1 | 0,5 | 0,05 | 2 | 0,29 | 0 | 0,02 | SI |
| Malvaceae | <i>Luehea divaricata</i> | 15 | 7,5 | 0,7 | 8 | 1,17 | 0,06 | 0,29 | SI |
| | <i>Pseudobombax marginatum</i> | 2 | 1 | 0,09 | 4 | 0,58 | 0 | 0,02 | ST |
| Anacardiaceae | <i>Schinus terebinthifolia</i> | 8 | 4 | 0,38 | 16 | 2,34 | 0,14 | 0,68 | ST |
| Apocynaceae | <i>Aspidosperma pyrifolium</i> | 71 | 35,5 | 3,33 | 46 | 6,73 | 0,46 | 2,22 | PI |
| Boraginaceae | <i>Auxemma oncocalyx</i> | 327 | 163,5 | 15,34 | 78 | 11,4 | 8,84 | 42,29 | SI |
| Burseraceae | <i>Bursera leptophloeo</i> | 19 | 9,5 | 0,89 | 22 | 3,22 | 0,93 | 4,45 | ST |
| Combretaceae | <i>Combretum leprosum</i> | 189 | 94,5 | 8,87 | 78 | 11,4 | 2,1 | 10,03 | SI |
| Ehretiaceae | <i>Cordia goeldiana</i> | 1 | 0,5 | 0,05 | 2 | 0,29 | 0 | 0 | SI |
| Nyctaginaceae | <i>Guapira graciliflora</i> | 16 | 8 | 0,75 | 24 | 3,51 | 0,06 | 0,28 | SI |
| Rhamnaceae | <i>Ziziphus joazeiro</i> | 2 | 1 | 0,09 | 4 | 0,58 | 0 | 0,02 | ST |
| Olcaceae | <i>Ximenia americana</i> | 4 | 2 | 0,19 | 2 | 0,29 | 0 | 0,02 | SI |
| Convolvulaceae | <i>Ipomoea incarnata</i> | 5 | 2,5 | 0,23 | 4 | 0,58 | 0,03 | 0,16 | PI |

Fonte: Autora. Onde: NI = número de indivíduos; DA = densidade absoluta; DR = densidade relativa; FA = frequência absoluta; FR = frequência relativa; DoA = dominância absoluta; DoR = dominância relativa; GE = grupo ecológico.

A espécie com maior ocorrência de indivíduos foi a *Croton sonderianus*, popularmente conhecida como “Marmeleiro” pertencente à família Euphorbiaceae e ao grupo ecológico – GE das pioneiras, com 482 indivíduos e consequentemente maior densidade relativa – DR (22,62%) e maior frequência relativa – FR (13,16%). No entanto, por se tratar predominantemente de indivíduos finos de pequeno porte, o valor de dominância relativa – DoR foi de somente 3,34% inferior ao de outras seis espécie identificadas. Nesse parâmetro, a

Auxemma onocalyx, de nome vulgar “Pau-branco” se destacou com DoR de 42,29% e devido a isso, essa espécie também se consolidou como o maior Índice de Valor de Importância – IVI (Figura 12), pois tal parâmetro caracteriza a importância de cada espécie na comunidade (sob a perspectiva horizontal) através da soma dos parâmetros: abundância, frequência e dominância relativas de cada espécie da associação vegetal. Entende-se que a ocorrência da *Auxemma onocalyx* na área de estudo é resultado do ambiente natural juntamente com o manejo da área para agricultura e/ou pecuária, pois a espécie apresenta grande capacidade de rebrota e dentre os indivíduos dessa espécie mensurados boa parte já havia sofrido corte.

Figura 12 – Índice de Valor de Importância (IVI) das espécies do estrato lenhoso amostradas em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



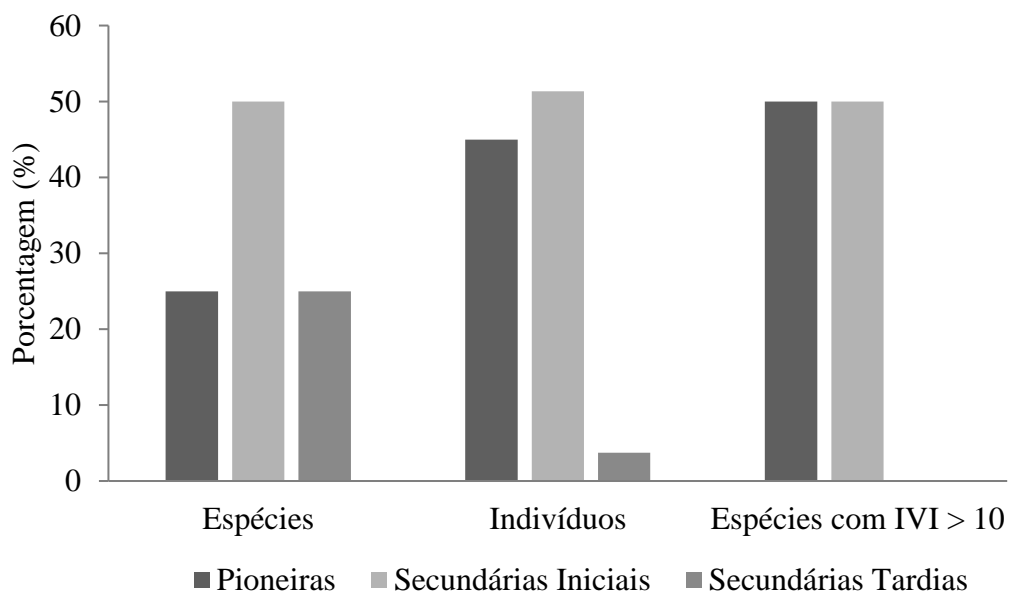
Fonte: Autora

No que diz respeito às características estruturais, observa-se predominância de indivíduos finos, com 70% da população total apresentando diâmetro inferior a 13,37 cm (Figura 13), demonstrando que a comunidade possui uma elevada taxa de regeneração e enfatizando o padrão normal para floresta ineqüânea que possuem três classes de idades misturadas no mesmo povoamento (ALVES *et al.*, 2012; LIMA; COELHO, 2015; GUEDES *et al.*, 2012). Essa inclusão da maioria dos indivíduos nas classes iniciais de diâmetro do caule

as espécies com maior Índice de Valor de Importância – IVI, somente são encontradas espécies pioneiras e secundárias iniciais, ambas com 50% de ocorrência (Figura 14).

Observa-se comportamento típico do grupo ecológico das pioneiras, que diz respeito ao grande número de indivíduos (38,9% do total) distribuídos em somente sete espécies, ocupando uma parte considerável do território, porém sem trazer diversidade a área. Enquanto, o grupo ecológico das secundárias iniciais é o principal responsável pela diversidade da vegetação, tanto em número de espécies, como em indivíduos e isso faz com que a área seja mais estável ecologicamente e consiga sustentar uma maior biodiversidade (Figura 14).

Figura 14 – Distribuição dos grupos ecológicos por espécies, indivíduos e espécies com Índice de Valor de Importância - IVI > 10 do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



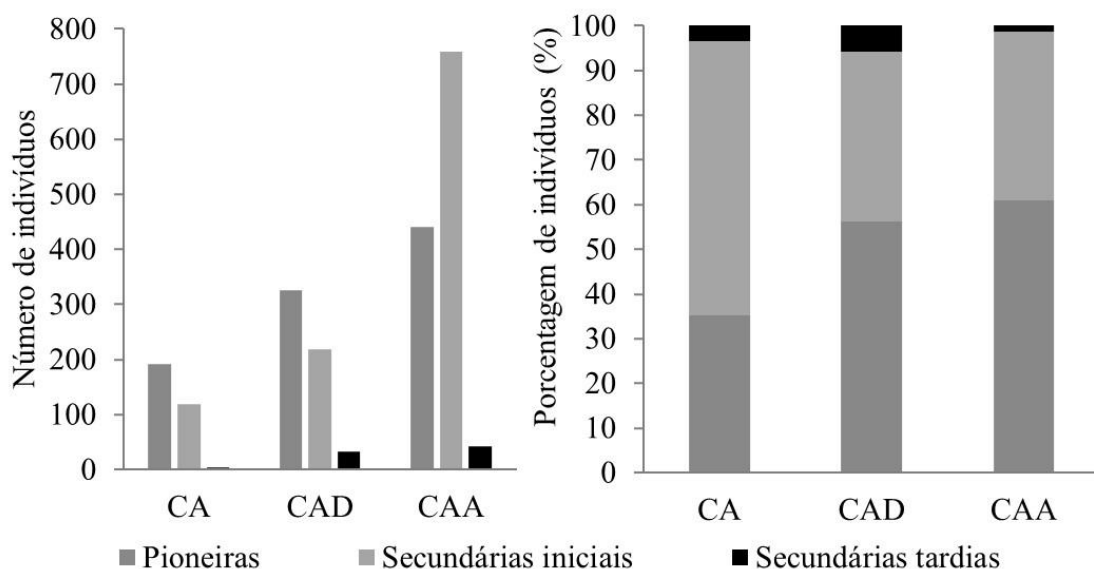
Fonte: Autora

Analisando as classes de sucessão por espécies, indivíduos e pelo IVI, observou-se a mesma tendência em todos os grupos, nos quais as secundárias iniciais não são superadas pelos outros grupos ecológicos, seguidas das pioneiras e por último das secundárias tardias. Um resultado semelhante foi encontrado no estudo realizado por Silva *et al.* (2016), que também registraram altos valores para espécies secundárias iniciais em um remanescente de Caatinga em Sergipe. O mesmo comportamento foi observado no trabalho de Carvalho *et al.* (2012) realizado na Paraíba.

Para a abordagem da área de estudo considerando as parcelas como unidades amostrais individuais capazes de descrever ambiente e a dinâmica ecológica da área de estudo, estas foram classificadas de acordo com Fernandes (1998) considerando principalmente a fisionomia da vegetação de cada parcela, tais classes foram: Caatinga Arbórea (CA), que apresenta-se como um tipo florestal, com um estrato arbóreo cuja altura é superior a 8 m, com 24 parcelas incluídas nessa classe; Caatinga Arbustiva Densa (CAD), com predominância de indivíduos cuja altura varia de 3 a 5 m e 13 parcelas incluídas nessa classe; Caatinga Arbustiva Aberta (CAA) semelhante a anterior porém com um dossel mais aberto e maior espaçamento entre os indivíduos, com 13 parcelas incluídas nessa classe.

No que diz respeito aos grupos ecológicos presentes em cada classe de vegetação e suas relações, observa-se que a maioria dos indivíduos mensurados estavam em parcelas classificadas como Caatinga Arbustiva Aberta (Figura 15), apesar dessa classe de vegetação contar somente com 13 das 50 parcelas medidas, logo, há um grande número de indivíduos nessa classe. Tais indivíduos, no entanto, são principalmente pertencentes ao grupo ecológico das pioneiras com caules finos e pouca biomassa. À medida que o porte da vegetação vai aumentando e a classe ao qual pertence vai modificando, as pioneiras que a princípio eram predominantes na classe de CAA são substituídas pelas secundária iniciais, nas classes seguintes CAD e por fim na CA.

Figura 15 – Distribuição dos grupos ecológicos em cada classe de vegetação: Caatinga Arbórea (CA), Caatinga Arbustiva Densa (CAD) e Caatinga Arbustiva Aberta (CAA), do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



Em mais de 70% das parcelas há predomínio de indivíduos pertencentes ao grupo ecológico das secundárias iniciais, somando-se ao fato de que cerca de 62 % delas apresentam pelo menos um indivíduo do grupo das secundárias tardias, demonstrando que a área encontra-se em estágio intermediário de sucessão ecológica, no qual as espécies pioneiras já não são dominantes e estão sendo substituídas por espécies dos outros grupos. Esse estágio apesar de não ser clímax do ecossistema, é capaz de sustentar uma biodiversidade bastante superior a do estágio inicial de sucessão e apresenta uma maior capacidade de sequestro de carbono, devido a constante ocorrência de novos indivíduos que durante seu crescimento consomem mais gás carbônico do que as árvores adultas que predominam no estágio final de sucessão.

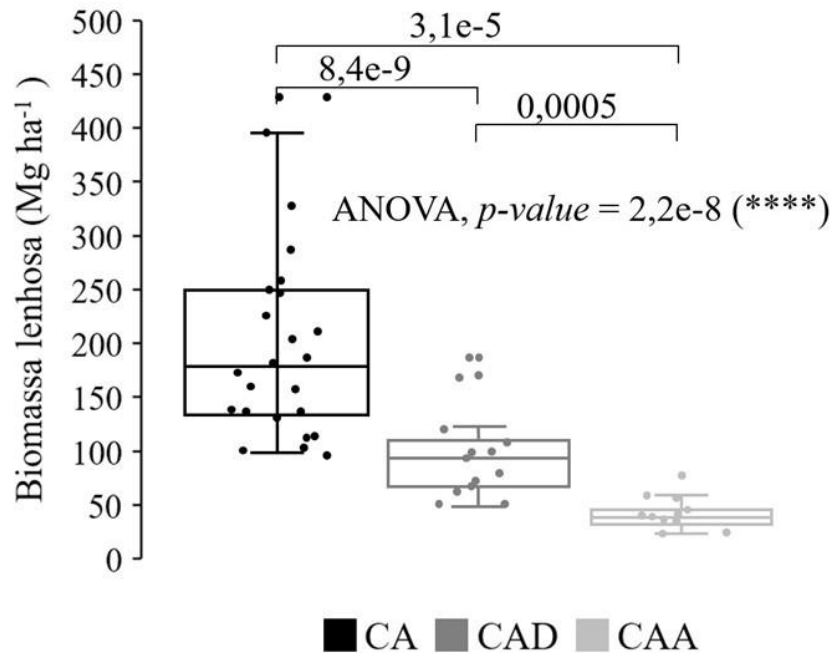
5.2 Estimativa da biomassa acima do solo e do estoque de carbono em campo

5.2.1 Componente lenhoso

A biomassa lenhosa em cada classe de vegetação é apresentada na Figura 16. Observa-se que de acordo com a estatística ANOVA, há diferença entre os grupos: Caatinga Arbórea – CA; Caatinga Arbustiva Densa – CAD e Caatinga Arbustiva Aberta – CAA. Quanto ao teste de Tukey que faz comparações múltiplas entre os pares de classes de vegetação, este mostra que há diferença significativa entre as médias de biomassa em cada classe.

A biomassa acima do solo média do componente lenhoso da vegetação estudada é de 199,09 Mg ha⁻¹ para áreas de CA, 95,23 Mg ha⁻¹ em CAD e 40,77 Mg ha⁻¹ para áreas de CAA (Figura 16). Considerando todas as parcelas, sem distinção de classe, a biomassa média foi de 130,92 Mg ha⁻¹. A mesma relação observada pode ser atribuída ao teor de carbono na vegetação, pois representa 44,53% da biomassa do componente lenhoso de acordo com Pereira Júnior *et al.* (2016). Em estudos semelhantes, também em área de Caatinga, no estado de Pernambuco, Lima Júnior *et al.* (2014) obtiveram valores similares as áreas de Caatinga Arbustiva Aberta com variação de 5,93 até 60,74 Mg ha⁻¹, já a biomassa estimada por Bradão *et al.* (2007) no estado do Ceará apresentou valor médio de 132,5 Mg ha⁻¹ para vegetação semi-densa, estado bem próximo aos quantitativos das áreas de Caatinga Arbórea e Arbustiva Densa.

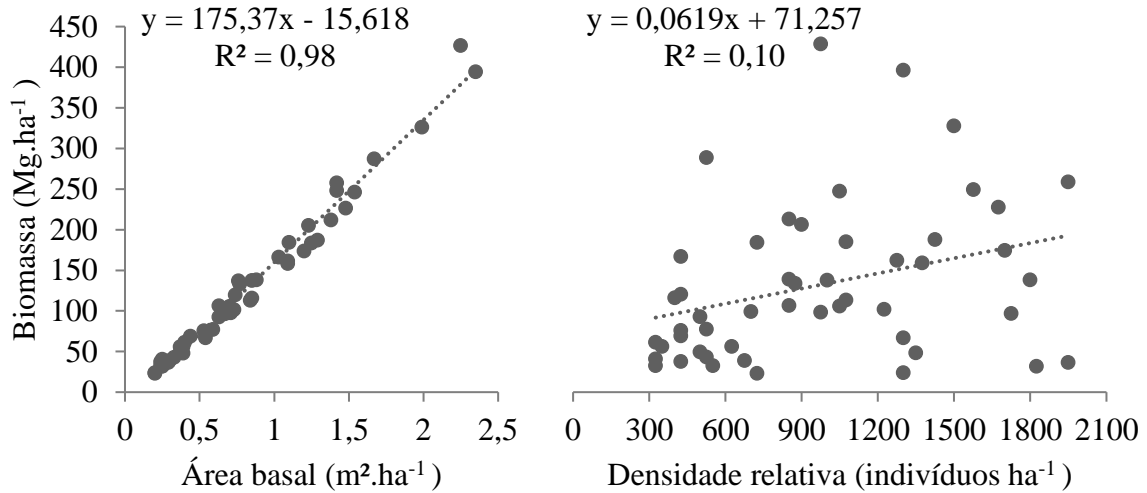
Figura 16 – Distribuição da biomassa lenhosa em áreas de Caatinga Arbórea (CA), Caatinga Arbustiva Densa (CAD) e Caatinga Arbustiva Aberta (CAA) no Assentamento 25 de maio, Madalena – CE.



Fonte: Autora

A estimativa da biomassa lenhosa e por conseguinte do estoque de carbono, foi obtida a partir de equação alométrica considerando o diâmetro das espécies, devido a isso há forte relação entre a quantidade de biomassa e suas respectivas áreas basais (Figura 17). No entanto, no que diz respeito ao número de indivíduos em termos de densidade absoluta de cada parcela, não existe relação bem definida, ou seja, áreas mais densas não tem necessariamente maior quantidade de biomassa, isso porque parcelas com muitos indivíduos finos tem menos biomassa em comparação com aquelas onde há menor número de indivíduos, mas os que nela se encontram apresentaram diâmetros maiores conforme ilustrado na Figura 17. A exemplo disso, de acordo com levantamento de dados em campo, um indivíduo de *Auxemma oncocalyx* tem biomassa média equivalente a cerca de 30 indivíduos de *Croton sonderianus*.

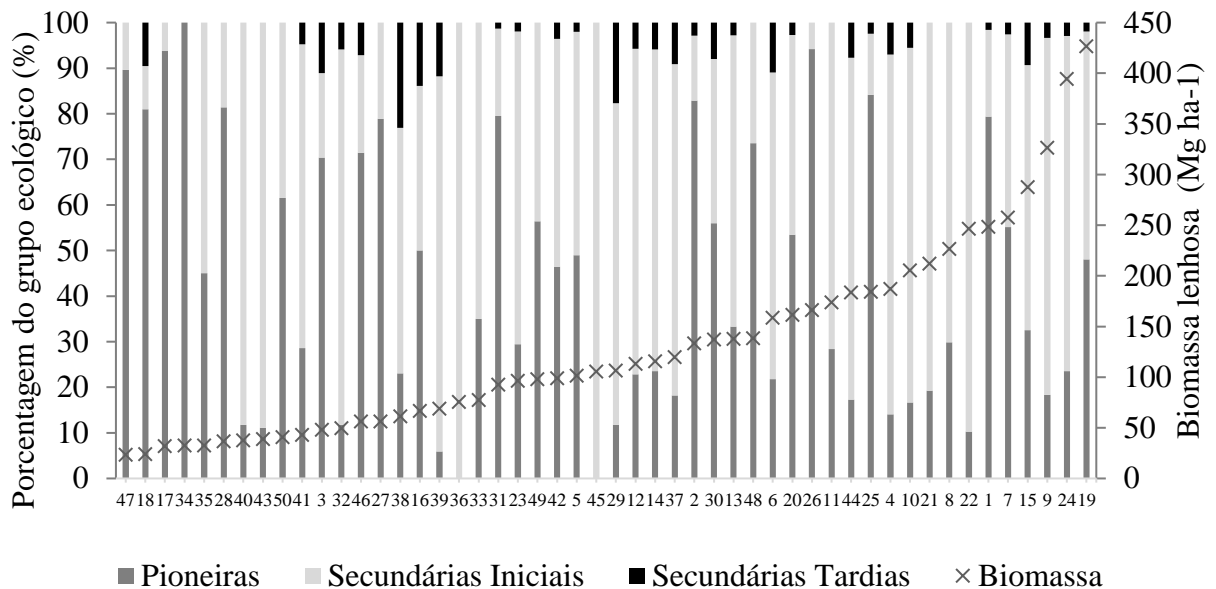
Figura 17 – Relação entre biomassa lenhosa e área basal (A) e relação entre biomassa lenhosa e densidade relativa (B) no levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



Fonte: Autora

Acerca do porte dos indivíduos, como mencionado anteriormente, pode-se relacionar a biomassa e o estoque de carbono com os grupos ecológicos presentes em cada parcela e conseqüentemente com seu estágio sucessional. Observa-se na Figura 18 que nas parcelas com menor quantidade de biomassa lenhosa tem a maioria de seus indivíduos pertencentes ao grupo das pioneiras, indicando que essas áreas ainda se encontram em estágio inicial de sucessão. Isso se deve principalmente à forte intervenção antrópica, por meio do desmatamento para obtenção de lenha e madeira para cerca, além do pastejo animal constante, que não permite o desenvolvimento da vegetação, associado a fatores como tipo de solo, relevo e regime hídrico.

Figura 18 – Relação entre a biomassa lenhosa e os grupos ecológicos presentes em cada parcela do levantamento do estrato lenhoso em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



Fonte: Autora

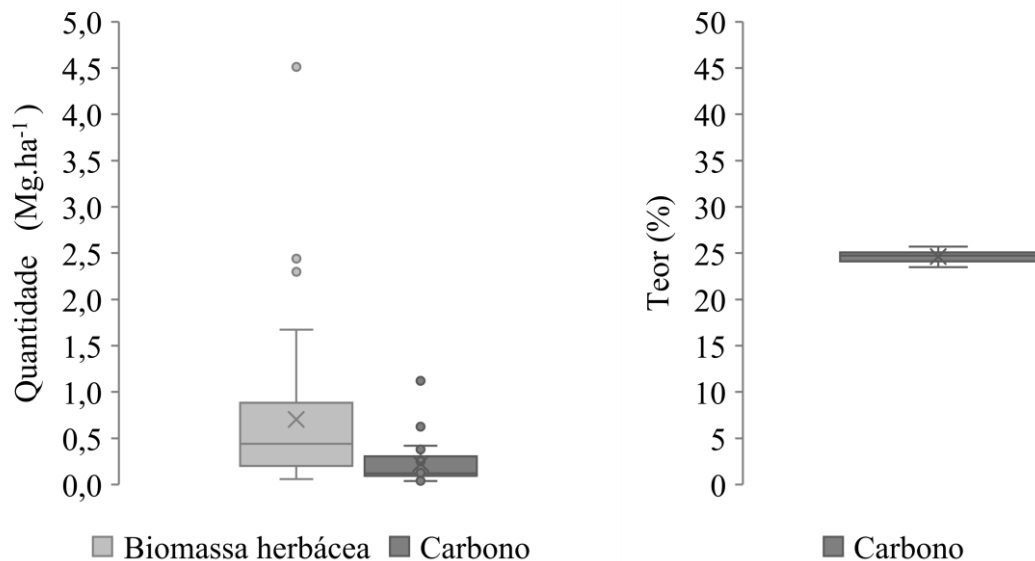
5.2.2 Componente herbáceo

A biomassa acima do solo média do componente herbáceo da vegetação é de 0,70 Mg ha⁻¹ (mínima de 0,06 Mg ha⁻¹ e máxima de 4,51 Mg ha⁻¹) com desvio padrão de 0,79 Mg ha⁻¹ (Figura 19). No levantamento de Socher *et al* (2007) o valor médio para a biomassa do estrato herbáceo foi de 0,45 Mg ha⁻¹ em área de Floresta Ambrófila Mista Aluvial, enquanto que na Caatinga, em área de pastagem plantada, Palacio *et al* (2019) obtiveram biomassa média de 3,22 Mg ha⁻¹. Apesar de fazer parte de um bioma diferente, a biomassa herbácea do estudo de Socher *et al* (2007) se assemelha mais ao levantamento realizado neste trabalho, isso por que ambas as áreas são florestais e tem uma alta cobertura do dossel, enquanto que no estudo Palacio *et al* (2019) a vegetação predominante é pastagem. Isso mostra que a presença ou ausência de luz regulada pelo dossel das árvores é um fator chave para a produção de biomassa herbácea.

O teor de carbono representa aproximadamente 25% da biomassa, com um desvio padrão de somente 0,7 %, apesar das diversas fisionomias de vegetação herbácea presentes na área, o teor de carbono em todas as parcelas foi praticamente constante em relação a quantidade de biomassa, ou seja, são parâmetros correlatos (Figura 19). As parcelas 17 e 18 apresentaram forte influência sobre a média, fazendo-a elevar, de modo que somente 30% das parcelas se encontram acima da média, aumentando também o desvio padrão. Nessas parcelas a quantidade

de biomassa lenhosa e a área basal foram as menores, ou seja, são regiões com menor cobertura da vegetação lenhosa que permitem uma maior entrada de luz e o crescimento da vegetação herbácea.

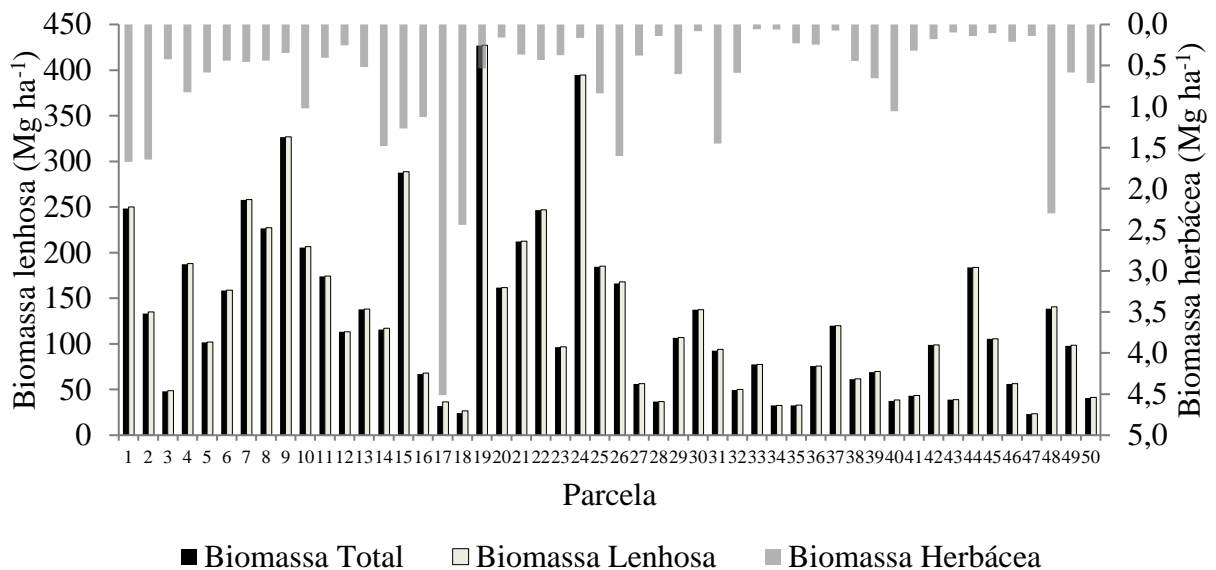
Figura 19 – Biomassa e teor de carbono do estrato herbáceo nas parcelas do levantamento em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



Fonte: Autora

A biomassa total, resultado da soma do componente lenhoso com o componente herbáceo apresenta valores praticamente idênticos aos da biomassa do estrato lenhoso, isso, obviamente, se deve a maior contribuição desse estrato, que representa em média 99% da biomassa total, enquanto que a biomassa herbácea é responsável em média somente pelos 1% restantes. Nas parcelas 17 e 18, que tem a maior contribuição da biomassa herbácea, esse componente representam somente 12,4% e 9% da biomassa total dessas parcelas, respectivamente (Figura 20).

Figura 20 – Biomassa lenhosa e biomassa herbácea em relação a biomassa total nas parcelas do levantamento em área de Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



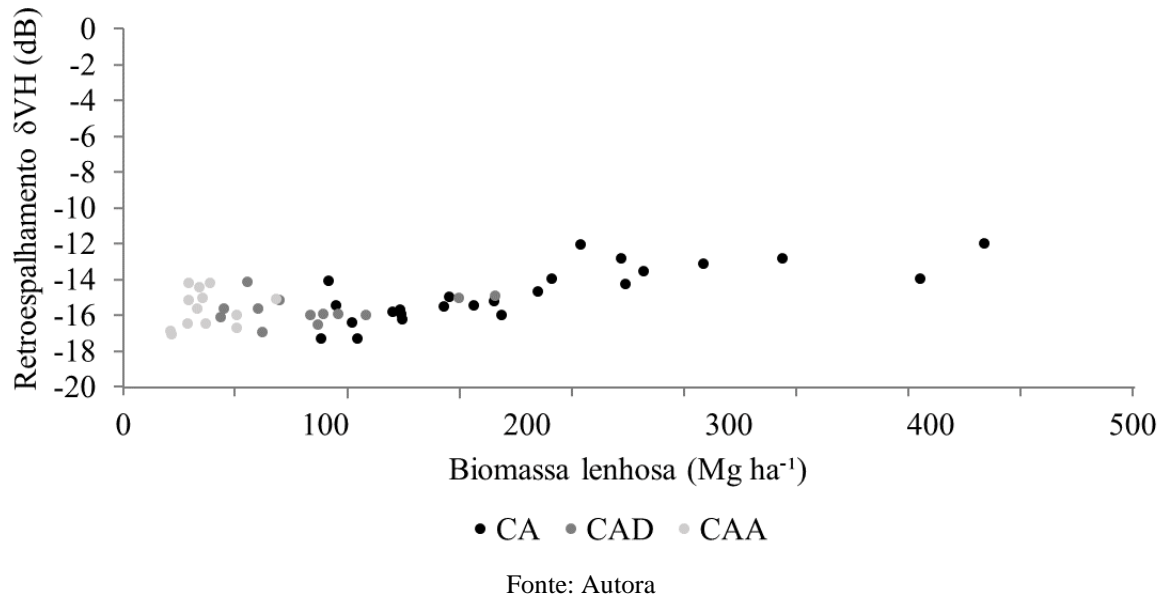
5.3 Biomassa medida em campo e as imagens dos satélites Sentinel

5.3.1 Polarizações derivadas do Sentinel-1 (SAR)

Os valores do retroespalhamento em ambas as polarizações (Vertical Vertical - VV e Vertical Horizontal - VH) são expressos em decibéis (dB) e podem variar de 0 a -35 dB para imagens SAR, dependendo das propriedades físicas e elétricas do alvo, quanto mais próximo de zero, portanto, maior o coeficiente de retroespalhamento e maior a rugosidade do alvo, no caso da vegetação o aumento do porte representa também um aumento no retroespalhamento.

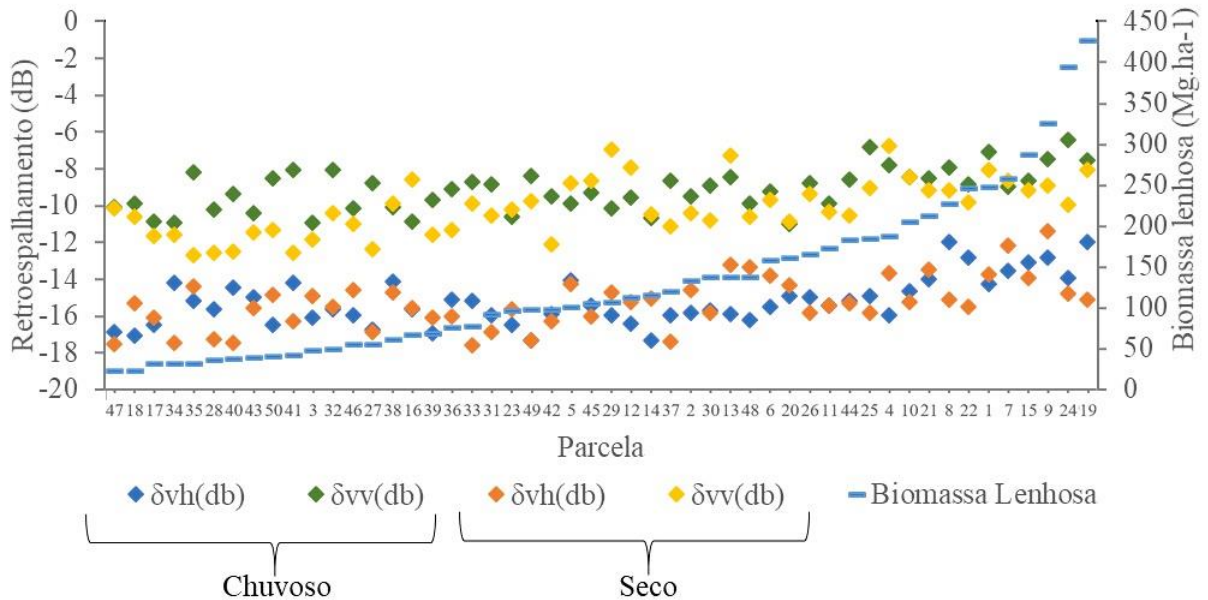
Quanto ao porte da vegetação medida, nas áreas classificadas como Caatinga Arbórea os valores médios de retroespalhamento na estação chuvosa foram -14,76 dB VH e -8,80 dB VV, para Caatinga Arbustiva Densa foi de -15,67 dB VH e -9,36 dB VV e para a Caatinga Arbustiva Aberta foi -15,63 dB VH e -9,60 dB VV (Figura 21), logo, em fisionomias de vegetação de maior porte, como na Caatinga Arbórea, o coeficiente de retroespalhamento foi superior às demais classes. Tais valores se assemelham aos de Castillo *et al* (2017) que foram de -13,19 dB VH e -7,86 dB VV para área de manguezal e -13,41 dB VH e -7,51 dB VV para área de coqueiral. Também para áreas de mangue, Vasconcelos (2016) obteve valores superiores aos de Castillo *et al* (2017) com retroespalhamento médio de -10,62 dB VH e -7,20 dB VV. Já em áreas de pastagem natural, no trabalho de Saraiva (2015) o retroespalhamento foi de somente -17,87 dB VH e -11,35 dB VV.

Figura 21 – Relação entre o coeficiente de retroespalhamento e a biomassa lenhosa nas diferentes fisionomias de vegetação da Caatinga no Assentamento 25 de Maio, Madalena-CE.



Na Figura 22, observa-se que à medida que a biomassa acima do solo do componente lenhoso aumenta, o valor do coeficiente de retroespalhamento também se eleva para ambas as polarizações (VV e VH), tanto para as imagens de radar obtidas na estação chuvosa, como na seca. Isso ocorre devido ao aumento da rugosidade da superfície provocada pelo porte da vegetação que está diretamente relacionado com a quantidade de biomassa, ou seja, onde há maior quantidade de biomassa a rugosidade é maior.

Figura 22 – Relação entre os coeficientes de retroespalhamento e a biomassa lenhosa na estação chuvosa e na estação seca.

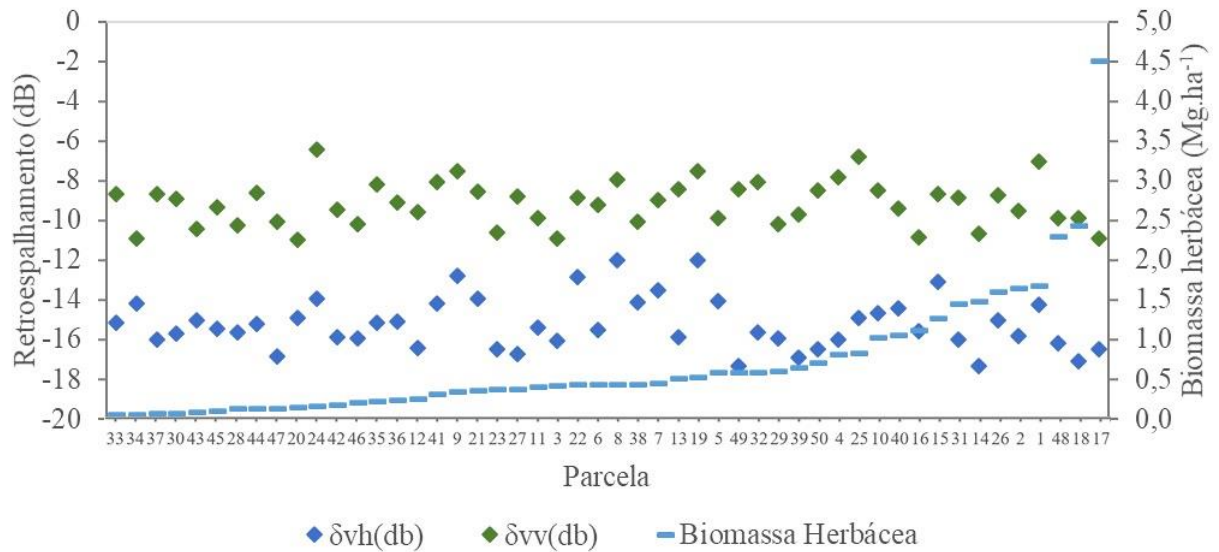


Fonte: Autora

Além disso, apesar das variações encontradas dentro de cada parcela dependendo da época do ano em que a imagem é obtida, tomando-se todo o conjunto das parcelas o comportamento é o praticamente o mesmo, tanto que o valor médio do coeficiente de retroespalhamento para a estação chuvosa é de -15,22 dB VH e -9,15 dB VV, enquanto que na estação seca é de -15,29 dB VH e -10,11 dB VV, conforme ilustra a Figura 22, logo, a presença das folhas na vegetação durante a estação chuvosa não interfere consideravelmente na resposta do radar, indicando que a interação do sinal ocorre principalmente com os galhos e tronco.

No que se refere a biomassa do estrato herbáceo, obtida somente durante a estação chuvosa, não há relação entre a biomassa e os coeficientes de retroespalhamento, durante o mesmo período do ano para ambas as polarizações (Figura 23). Os coeficientes de correlação foram de somente 0,02 e 0,05 para as polarizações VV e VH, respectivamente. Nesse caso, a fraca relação pode ser entendida como resultado da dificuldade de interação do sinal de radar com o alvo que se encontra abaixo do dossel das árvores do componente lenhoso, além da ordem de grandeza, considerando que a biomassa herbácea somente representa em média 1 % da biomassa total.

Figura 23 – Relação entre os componentes de retroespalhamento e a biomassa herbácea.

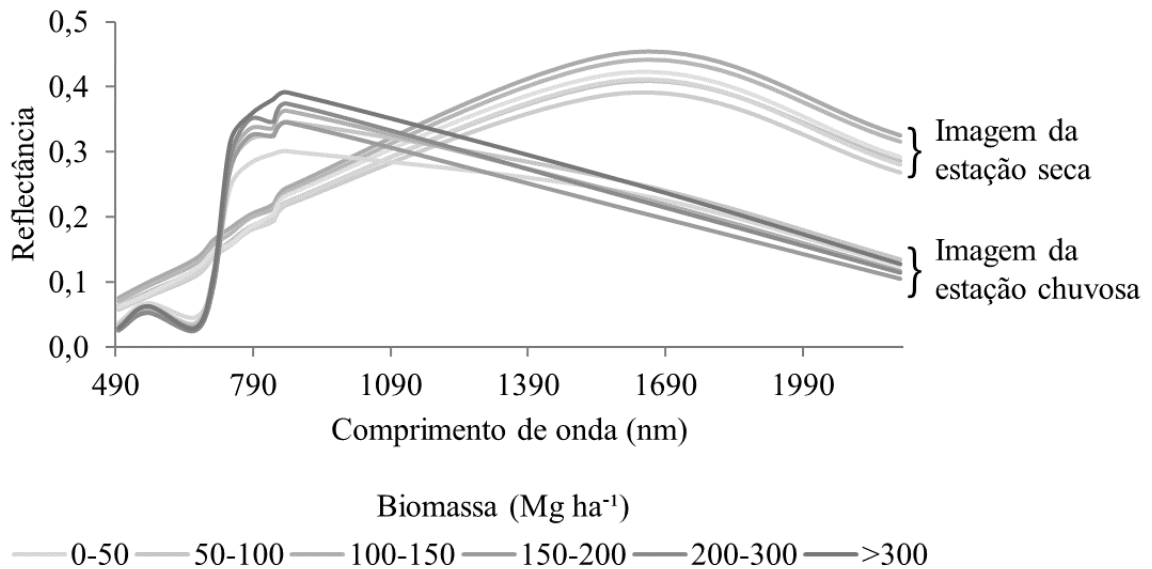


Fonte: Autora

5.3.2 Bandas individuais do sensor multiespectral Sentinel-2

O comportamento espectral de parcelas com diferentes quantidades de biomassa lenhosa é apresentado na Figura 24 para as imagens da estação chuvosa e seca. Conforme esperado, na estação chuvosa ocorre um pico de reflectância na região do infravermelho a partir de 750 nm, devido a interação com a clorofila, já na estação seca esse pico não ocorre, pois nesse período as árvores perdem suas folhas. Observa-se, que durante a estação chuvosa, na parcela com menor quantidade de biomassa lenhosa ($24,12 \text{ Mg ha}^{-1}$), a refletância de todos os comprimentos de onda também é menor em relação as demais. No entanto, já no próximo patamar ($49,51 \text{ Mg ha}^{-1}$) o comportamento espectral se confunde com o das parcelas com até mais de 400 Mg ha^{-1} e da mesma forma na estação seca, onde o comportamento espectral das parcelas com quantidades mínimas e máximas de biomassa é praticamente o mesmo. Isso indica saturação do sinal, ou seja, a partir de determinada quantidade de biomassa, não há variação na interação com espectro eletromagnético capaz de identifica-la.

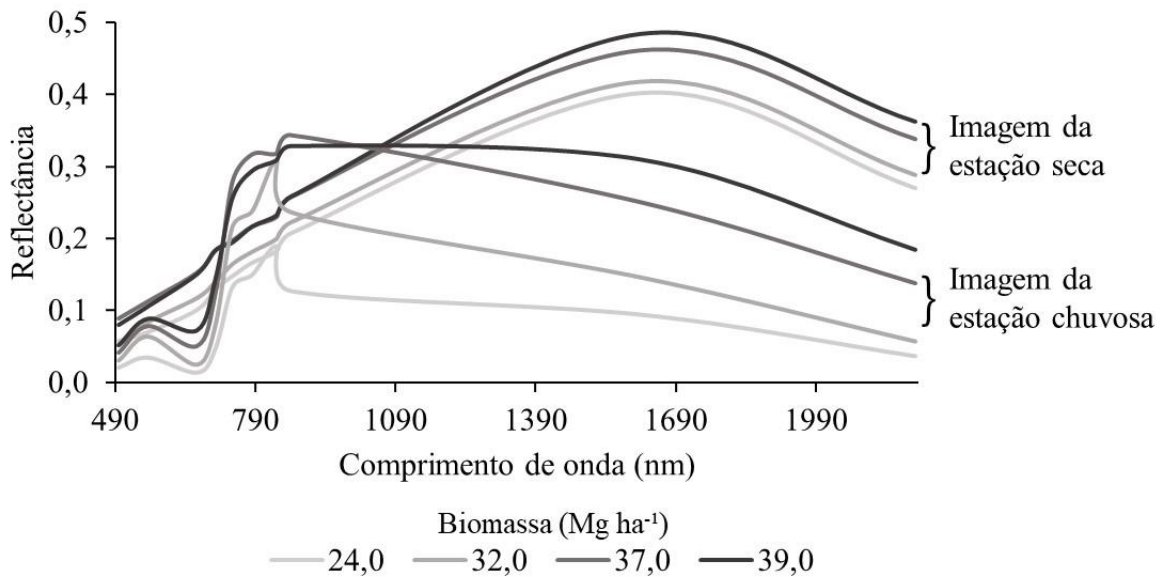
Figura 24 – Comportamento espectral das imagens em parcelas com diferentes quantidades de biomassa no período chuvoso e no período seco.



Fonte: Autora

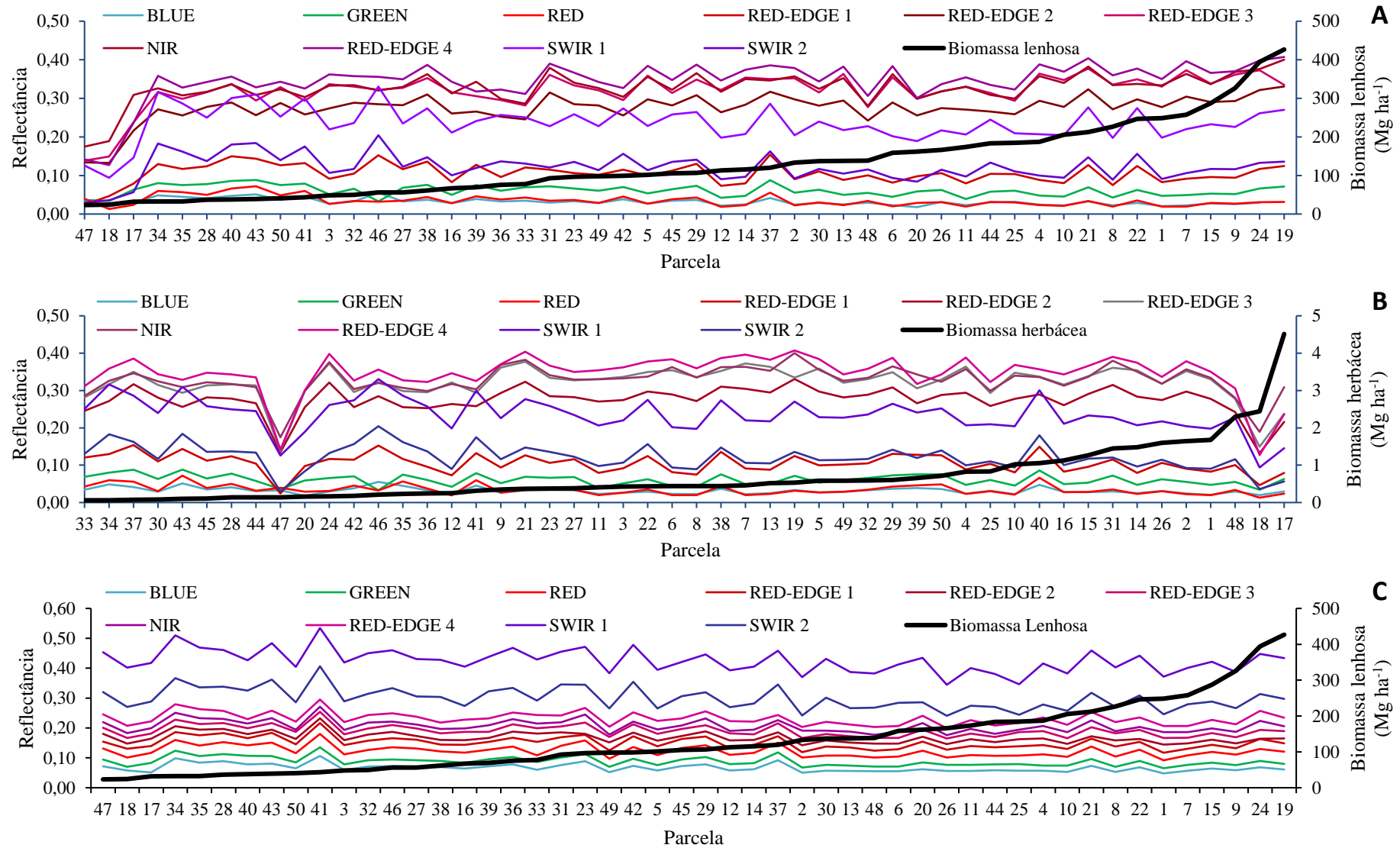
Para encontrar em que patamar ocorre a saturação, a Figuras 25 apresentam o comportamento espectral de parcelas com biomassa abaixo dos $39,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, para ambas as épocas do ano. Analisando-as é possível observar que a medida que a quantidade de biomassa aumenta a refletância das bandas também, de uma forma mais clara na estação chuvosa, mas também perceptível na estação seca, logo, a saturação do sinal do sensor multiespectral MSI/Sentinel-2 não ocorre em parcelas com biomassa lenhosa inferior a 40 Mg ha^{-1} . Tal patamar de saturação também foi descrito por Huang *et al.* (2018).

Figura 25 – Comportamento espectral das imagens em parcelas com quantidades de biomassa inferior a 39,0 Mg ha⁻¹ no período chuvoso e no período seco.



O comportamento de cada banda do sensor MSI/Sentinel-2 em relação a cada uma das 50 parcelas do levantamento é apresentado na Figura 26. Observa-se em relação a biomassa lenhosa na estação chuvosa (Figura 26 A), que as parcelas com menor quantidade de biomassa também apresentaram as menores reflectâncias para todas as bandas do sensor. Quanto a biomassa herbácea, as parcelas com maior quantidade de biomassa foram exatamente aquelas com também menor reflectância, diferente do comportamento observado para a biomassa lenhosa na estação chuvosa (Figura 26 B). E na estação seca (Figura 26 C) o comportamento espectral de todas as bandas foi semelhante em todas as parcelas, havendo a mesma variação na intensidade da reflectância de cada banda do mesmo modo para cada parcela, mantendo patamares de reflectância semelhantes independentemente da quantidade de biomassa.

Figura 26 – Comportamento de cada banda do sensor em cada uma das 50 parcelas em relação a biomassa lenhosa na estação chuvosa (A), a biomassa herbácea (B) e a biomassa lenhosa na estação seca (C).



5.3.3 *Análise multivariada dos dados de sensoriamento remoto e de campo*

A fim de comparar e analisar as variáveis de sensoriamento remoto obtidas dos satélites Sentinel e as medições de biomassa em campo, foi aplicada a análise fatorial e a análise de componentes principais aos dados normalizados da imagem da estação chuvosa e da estação seca. O melhor comportamento das variáveis foi composto por duas componentes em ambas estações do ano. A seleção da quantidade de componentes foi realizada de acordo com as recomendações de Jolliffe (2002), que diz que a variância original é suficientemente representada por porcentagem de variância acumulada acima dos 70% e por componentes com variância superior a 1%. Nesse estudo as variâncias acumuladas das duas componentes foram superiores a 90% tanto na estação chuvosa, como na seca.

Os testes de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de esfericidade de Bartlett realizados verificaram o ajuste dos dados à análise fatorial e à análise de componentes principais, resultando em valores satisfatórios. Para o KMO, são razoáveis valores entre 0,6 e 0,7, são considerados médios valores de entre 0,7 e 0,8, bons são aqueles entre 0,8 e 0,9 e muito bons quando o valor do KMO é maior que 0,9 (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JUNIOR, 2010). Para a análise das variáveis derivadas da imagem da estação chuvosa o valor obtido no teste KMO foi 0,78 e para a estação seca foi 0,74, logo são bons e indicam ajuste dos dados a análise.

Em relação ao teste de esfericidade de Bartlett, que testa a hipótese de que as variáveis não sejam relacionadas na população, para que o método de análise fatorial seja adequado, deve-se rejeitar a hipótese nula de que a matriz de correlações é identidade, ou seja, o valor da significância do teste de Bartlett deve ser menor que 0,05 (HAIR, et al, 2009). Nesse estudo, para a análise das variáveis derivadas da imagem da estação chuvosa e também para as da estação seca, a significância obtida nesse teste foi de $2,2e-16$, confirmando a adequação dos dados para a análise fatorial e análise de componente principal.

Com o objetivo é facilitar a visualização da relação entre as variáveis observadas e os componentes extraídos foi empregado o algoritmo Varimax, que maximiza a variância entre os fatores, alterando a raiz característica sem afetar a proporção da variância total explicada pelo conjunto, resultando na matriz rotacionada entre as variáveis observadas e os componentes extraídos (ANDRADE et al., 2007).

Para a estação chuvosa, as cargas fatoriais de cada variável da matriz rotacionada podem ser visualizadas na Tabela 4 assim como suas respectivas comunalidades. Essa última representa a proporção da variância para cada variável incluída na análise que é explicada pelos

componentes extraídos. No caso da biomassa lenhosa, observa-se que os fatores extraídos na estação chuvosa explicam 51% de sua variância.

Na Tabela 4 e na Figura 27, observa-se que as duas componentes principais das variáveis no período chuvoso determinadas pela análise fatorial e pela análise de componente principal, explicam 98,86% da variância total das variáveis originais desse período. Na componente 2, a componente que melhor explica a variação da biomassa lenhosa a partir dos dados de sensoriamento remoto, das 22 das variáveis, oito apresentaram peso superior a 0,5, mostrando que são mais significativas na determinação da biomassa, são elas: RE2, RE3, NIR, RE4, SAVI, IRECI, NDVIRE3 e SVH.

Observa-se nesse grupamento a presença das bandas do espectro eletromagnético a partir do RED, passando pelas bandas *red-edge* até o infravermelho próximo (NIR). Logo os comprimentos de ondas significativos para a determinação da biomassa lenhosa na estação chuvosa variam entre 664,5 nm e 835,1 nm.

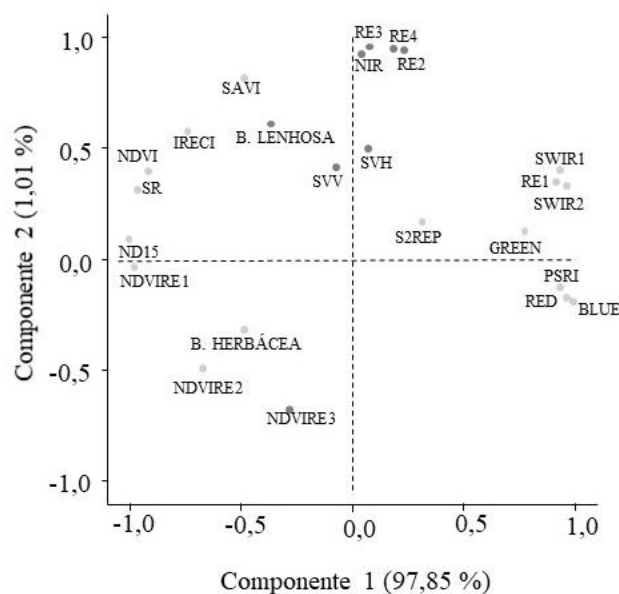
Quanto a biomassa herbácea, a comunalidade é de 31 % e a componente 1 é a que melhor explica a variação dessa biomassa. Nela se destacam as variáveis: BLUE, GREEN, RED, RE1, SWIR1, SWIR2, NDVI, SR, PSRI, ND15, IRECI, NDVIRE1, NDVIRE2, todas com carga fatorial superior a 0,5.

Tabela 4 – Cargas fatoriais padronizadas com base na matriz de correlação e comunalidade das variáveis utilizando dados de imagens da estação chuvosa.

| Variável | Componente 1 | Componente 2 | Comunalidade (%) |
|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| BLUE | 0,92 | -0,17 | 88 |
| GREEN | 0,73 | 0,14 | 55 |
| RED | 0,90 | -0,16 | 83 |
| RE 1 | 0,86 | 0,36 | 88 |
| RE 2 | 0,22 | 0,95 | 94 |
| RE 3 | 0,08 | 0,97 | 94 |
| NIR | 0,03 | 0,93 | 86 |
| RE 4 | 0,18 | 0,96 | 96 |
| SWIR 1 | 0,88 | 0,41 | 95 |
| SWIR 2 | 0,91 | 0,34 | 94 |
| NDVI | -0,86 | 0,41 | 91 |
| SR | -0,90 | 0,33 | 92 |
| SAVI | -0,46 | 0,83 | 90 |
| PSRI | 0,88 | -0,12 | 79 |
| ND15 | -0,94 | 0,1 | 90 |
| IRECI | -0,7 | 0,59 | 85 |
| S2REP | 0,29 | 0,18 | 12 |
| NDVIRE1 | -0,92 | -0,02 | 84 |
| NDVIRE2 | -0,63 | -0,47 | 63 |
| NDVIRE3 | -0,27 | -0,66 | 51 |
| SVH | 0,06 | 0,52 | 27 |
| SVV | -0,07 | 0,43 | 19 |
| B. LENHOSO | -0,34 | 0,63 | 51 |
| B. HERBÁCEO | -0,47 | -0,3 | 31 |

Fonte: Autora

Figura 27 –Análise de Componentes Principais da biomassa lenhosa e herbácea com os dados de sensoriamento remoto da estação chuvosa.



Fonte: Autora

As duas componentes principais das variáveis no período seco determinadas pela análise fatorial e pela análise de componente principal, explicam 99,96% da variância total das variáveis originais desse período. A componente 1 é a que melhor explica a variação da biomassa lenhosa no período seco, nela destacam-se 14 variáveis de sensoriamento remoto com carga fatorial superior a 0,5 (Tabela 5). A comunalidade da biomassa lenhosa no período seco é 23%, pois apesar da componente 1 um ter uma carga fatorial de 0,47 a componente 2 tem somente carga fatorial de somente 0,11.

Durante a estação seca, todas as bandas derivadas do sensor multiespectral MSI/Sentinel-2 apresentaram o sentido e o valor da correlação semelhantes, formando assim um grupo de variáveis, conforme observa-se em destaque no mapa percentual ilustrado na Figura 28. Esse grupamento das bandas se deve ao fato de que a resposta espectral da vegetação da Caatinga sem as folhas no período seco é semelhante à do solo tornando difícil diferenciar as fisionomias da vegetação. Nesse caso, a biomassa lenhosa apresentou uma melhor relação com os índices NDVIRE2 e NDVIRE3, e com a decomposição polarimétrica δVH do satélite Sentinel-1. Esses índices acentuam a capacidade das bandas *red-edge* de identificar vegetação verde, pois essas bandas são as que tem maior interação com a clorofila (CHO; SKIDMORE, 2009). E a decomposição δVH é melhor para identificar árvores devido a polarização cruzada

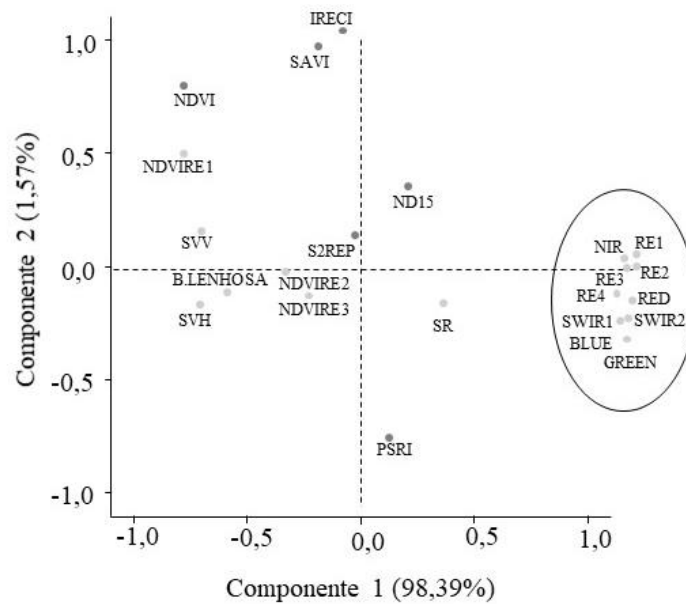
nos sentidos horizontal e vertical que permite inferir o porte da vegetação a partir da altura (MITCHARD *et al.*, 2009; SARAIVA, 2015; CASTILLO, *et al.*, 2017)

Tabela 5 – Cargas fatoriais padronizadas com base na matriz de correlação e comunalidade das variáveis utilizando dados de imagens da estação seca.

| Variável | Componente 1 | Componente 2 | Comunalidade (%) |
|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| BLUE | 0,94 | -0,22 | 92 |
| GREEN | 0,95 | -0,21 | 95 |
| RED | 0,94 | -0,28 | 97 |
| RE 1 | 0,97 | -0,15 | 97 |
| RE 2 | 0,98 | 0,03 | 96 |
| RE 3 | 0,98 | 0,00 | 96 |
| NIR | 0,95 | 0,00 | 90 |
| RE 4 | 0,95 | 0,03 | 89 |
| SWIR 1 | 0,91 | -0,12 | 85 |
| SWIR 2 | 0,94 | -0,21 | 92 |
| NDVI | -0,61 | 0,71 | 89 |
| SR | 0,3 | -0,16 | 11 |
| SAVI | -0,14 | 0,89 | 81 |
| PSRI | 0,11 | -0,7 | 50 |
| ND15 | 0,17 | 0,32 | 13 |
| IRECI | -0,05 | 0,94 | 89 |
| S2REP | 0,00 | 0,11 | 1,1 |
| NDVIRE1 | -0,61 | 0,45 | 57 |
| NDVIRE2 | -0,26 | -0,03 | 6,7 |
| NDVIRE3 | -0,17 | -0,13 | 4,5 |
| SVH | -0,56 | -0,16 | 33 |
| SVV | -0,56 | 0,14 | 33 |
| B. LENHOSO | -0,47 | -0,11 | 23 |

Fonte: Autora

Figura 28 – Análise de Componentes Principais da biomassa lenhosa com os dados de sensoriamento remoto da estação seca.



Fonte: Autora

5.4 Modelagem da biomassa

Para análise de regressão da biomassa lenhosa utilizando os dados obtidos dos sensores MSI/Sentinel-2 e SAR-C/Sentinel-1 foram consideradas duas épocas ano distintas, a estação chuvosa e a estação seca, isso para que a estimativa de biomassa possa ser realizada durante todo o ano, pois modelos gerados com imagem da estação chuvosa não podem ser aplicados utilizando-se imagens da estação seca e da mesma forma ao contrário, além de contornar o problema da disponibilidade de imagens sem nuvens. Enquanto que para a biomassa herbácea foram analisados somente dados da estação chuvosa devido a ocorrência sazonal desse tipo de vegetação.

Os modelos de regressão foram aplicados para as imagens obtidas na estação seca e chuvosa para ambos os componentes da vegetação (lenhosa e herbácea). Os resumos descritivos dos modelos gerados pelo método *stepwise backward* estão apresentados na Tabela 6 sem qualquer tipo de ajuste, sendo estes provenientes da primeira rodada de testes do modelo, o que inclui todas as 50 parcelas e 21 variáveis obtidas dos sensores MSI/Sentinel-2 e SAR-C/Sentinel 1. Portanto, apresenta o ponto inicial de cada modelo para, a partir destes iniciar o processo de ajuste.

De modo geral os coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aju}) registraram um desempenho abaixo de 0,7 para todos os modelos. Observa-se que no modelo 12T, cujo desempenho foi o melhor dentre os modelos gerados, atingindo 0,68 de R^2_{aju} , foram utilizadas 10 das 21 variáveis explicativas. De modo geral, os modelos obtidos com os dados dos sensores na estação chuvosa foram superiores aos da estação seca.

Tabela 6 – Resumo dos modelos de regressão múltipla pelo método *stepwise backward* para cada tipo de biomassa.

| Imagens | Variável dependente | Variáveis explicativas | Nº de variáveis explicativas | R ² | R ² _{ajs} | RMSE (Mg ha ⁻¹) | Código do modelo |
|-----------------|---------------------|------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------|
| Estação chuvosa | Biomassa lenhosa | S1 e S2 | 7 | 0,68 | 0,63 | 57,74 | 12LC |
| | | S1 | 2 | 0,31 | 0,28 | 80,84 | 1LC |
| | | S2 | 8 | 0,70 | 0,64 | 56,79 | 2LC |
| | Biomassa herbácea | S1 e S2 | 9 | 0,61 | 0,52 | 0,55 | 12H |
| | | S1 | 1 | 0,05 | 0,03 | 0,78 | 1H |
| | | S2 | 7 | 0,57 | 0,50 | 0,56 | 2H |
| | Biomassa total | S1 e S2 | 10 | 0,81 | 0,68 | 46,16 | 12T |
| | | S1 | 2 | 0,56 | 0,54 | 64,44 | 1T |
| | | S2 | 9 | 0,72 | 0,66 | 55,33 | 2T |
| Estação seca | Biomassa lenhosa | S1 e S2 | 8 | 0,58 | 0,51 | 66,08 | 12LS |
| | | S1 | 2 | 0,38 | 0,35 | 76,20 | 1LS |
| | | S2 | 8 | 0,51 | 0,41 | 72,74 | 2LS |

Fonte: Autora. Onde: S1 = Sentinel-1; S2= Sentinel-2; 12LC = Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1 e Sentinel-2; 1LC = Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1; 2LC = Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-2; 12H = Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1 e Sentinel-2; 1H = Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1; 2H = Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-2; 12T = Modelo de biomassa total com dados Sentinel-1 e Sentinel-2; 1T = Modelos de biomassa total com dados Sentinel-1; 2T = Modelos de biomassa total com dados Sentinel-2; 12LS = Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1 e Sentinel-2; 1LS = Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1; 2LS = Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-2.

Diante dos modelos iniciais para cada cena com as respectivas biomassas, seguiu-se com o processo de ajustes, a fim de elevar seus coeficientes de determinação, e, por conseguinte, melhorar sua capacidade de predição. Para tal, os ajustes se basearam na correlação entre as variáveis explicativas do modelo, na identificação de outliers através do

teste de *leverage*, que identifica pontos de alavanca ou valores extremos na variável explicativa, distância de *cook*, que se trata de uma medida da influência de uma observação ao realizar-se uma análise de regressão de mínimos quadrados e na análise dos resíduos.

O Quadro 1 e a Tabela 7 apresentam respectivamente os modelos obtidos após realizados os ajustes e seus parâmetros, respectivamente. Houve melhoria no desempenho de todos os modelos gerados inicialmente. Observa-se também que foram retirados outliers (parcelas) que estavam interferindo negativamente, sendo removida pelo menos uma parcela em cada modelo. O número de variáveis explicativas quando não foi reduzido manteve-se com a mesma quantidade de variáveis do modelo sem ajuste.

Quadro 1 - Equações preditivas dos modelos ajustados de estimativa de biomassa para cada compartimento estudado (biomassa lenhosa na estação chuvosa, biomassa herbácea, biomassa total e biomassa lenhosa na estação seca).

| Código do modelo | Equação preditiva do modelo |
|-------------------------|--|
| 12LCA 2LCA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = 4375,7 - 39884,7 RED - 4681,3 RE3 + 14521,5 SWIR1 - 7316,1 NDVI + 6356,8 ND15 - 2925,3 NDVIRE3$ |
| 1LCA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = -488,03 - 26,37 \delta VH - 23,45 \delta VV$ |
| 12HA 2HA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = -1,6 + 31,7 BLUE + 13,8 RE3 - 19,4 SWIR1 + 8,7 PSRI - 2,9 IRECI + 6,7 NDVIRE1 + 11,3 NDVIRE3$ |
| 1HA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = -1,29 - 0,13 \delta VH$ |
| 12TA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = 2953,1 - 24620,94 RED + 5516,87 SWIR1 - 4316,71 NDVI + 2215,96 ND15 + 22,68 \delta VV$ |
| 1TA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = -474,06 - 24,45 \delta VH - 22,95 \delta VV$ |
| 2TA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = 4361,0 - 39777,52 RED - 4687,63 RE3 + 14687,55 SWIR1 - 7295,15 NDVI + 6357,28 ND15 - 2921,03 NDVIRE3$ |
| 12LSA 2LSA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = 5718,7 - 29000,5 RED - 18692,3 RE3 + 13545 RE4 + 14294,3 SWIR1 - 23199,2 SAVI + 14066,1 ND15 + 3292,1 NDVIRE1 - 5681,7 NDVIRE3$ |
| 1LSA | $Biomassa (Mg ha^{-1}) = 724,58 + 22,59 \delta VH + 24,53 \delta VV$ |

Fonte: Autora. Onde: 12LCA = Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 ajustado; 1LCA = Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-1 ajustado; 2LCA = Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-2 ajustado; 12HA = Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 ajustado; 1HA = Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-1 ajustado; 2HA = Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-2 ajustado; 12TA = Modelo de biomassa total com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 ajustado; 1TA = Modelos de biomassa total com dados Sentinel-1 ajustado;

2TA = Modelos de biomassa total com dados Sentinel-2 ajustado; 12LSA = Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1 e Sentinel-2 ajustado; 1LSA = Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-1 ajustado; 2LSA = Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-2 ajustado.

Tabela 7 – Resumo dos modelos de regressão múltipla ajustados de estimativa de biomassa para a cada compartimento estudado (biomassa lenhosa na estação chuvosa, biomassa herbácea, biomassa total e biomassa lenhosa na estação seca).

| Imagens | Variável dependente | Variáveis explicativas | Nº de variáveis explicativas | Nash–Sutcliffe | R² | R²ajs | RMSE (Mg ha⁻¹) | Código do modelo |
|-----------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Estação chuvosa | Biomassa lenhosa | S1 e S2 | 6 | 0,81 | 0,81 | 0,78 | 44,47 | 12LCA |
| | | S1 | 2 | -1,13 | 0,30 | 0,27 | 80,90 | 1LCA |
| | | S2 | 6 | 0,81 | 0,81 | 0,78 | 44,47 | 2LCA |
| | Biomassa herbácea | S1 e S2 | 7 | 0,61 | 0,61 | 0,54 | 0,54 | 12HA |
| | | S1 | 1 | -0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,79 | 1HA |
| | | S2 | 7 | 0,61 | 0,61 | 0,54 | 0,54 | 2HA |
| | Biomassa total | S1 e S2 | 5 | 0,80 | 0,80 | 0,77 | 45,35 | 12BTA |
| | | S1 | 2 | -1,08 | 0,45 | 0,43 | 58,28 | 1TA |
| | | S2 | 6 | 0,60 | 0,81 | 0,78 | 44,53 | 2TA |
| Estação seca | Biomassa lenhosa | S1 e S2 | 8 | 0,61 | 0,61 | 0,53 | 65,12 | 12LSA |
| | | S1 | 2 | 0,39 | 0,34 | 0,31 | 75,96 | 1LSA |
| | | S2 | 8 | 0,61 | 0,61 | 0,53 | 65,12 | 2LSA |

Fonte: Autora

Quanto aos modelos finais após o ajustes, aqueles que utilizam dados S1 e S2, para biomassa lenhosa na estação chuvosa e seca (12LCA e 12LSA) e para biomassa herbácea (12HA) ficaram iguais aos modelos que utilizam somente dados S2, logo, o processo de ajuste retirou dos modelos iniciais os dados Sentinel-1, indicando que tais variáveis provenientes do radar não acrescentam informação relevante aos modelos.

Além disso, os modelos que utilizam somente dados do sensor SAR-C/Sentinel-1 apresentaram menos variação no desempenho, ainda resultando em modelos ruins, mesmo após os ajustes, isso se deve a menor quantidade de dados usados na geração desses modelos que compreendem somente duas variáveis explicativas. Logo, esses dados não tem potencial de

predizer a biomassa separadamente, servindo somente como complemento para a melhoria dos modelos que utilizam dados de sensor multiespectral.

No processo de ajuste para a modelagem da biomassa lenhosa durante a estação chuvosa, os modelos 12LCA e 2LCA foram gerados retirando-se a parcela 46. Tal parcela apresentou valores elevados tanto do teste de *leverage*, como na distância de *cook*, ao analisá-la observou-se que a quantidade de biomassa lenhosa da mesma estava entre os menores valores, com 56,17 Mg ha⁻¹ e a densidade absoluta de somente 350 Indivíduos ha⁻¹. Logo, os poucos indivíduos da parcela eram predominantemente indivíduos de caule grosso, diferente das parcelas semelhantes que geralmente apresentam mais indivíduos, porém indivíduos finos que pouco contribuem para a biomassa.

Enquanto que a refletância das bandas SWIR1, SWIR2 e RE1 na referida parcela 46 apresentaram um pico em relação as demais parcelas com biomassa semelhante, e a banda GREEN teve uma menor refletância também em relação aquelas com quantidade de biomassa semelhante para o mesmo período do ano (Figura 26 A). Entende-se que o baixo número de indivíduos tornou o dossel mais espaçado e a resposta espectral mais semelhante ao solo do que a vegetação verde.

Em relação a biomassa herbácea os modelos ajustados 12HA e 2BHA também foram gerados retirando-se a mesma parcela, considerada um *outlier* de acordo com os resultados dos testes de ajuste. A parcela retirada (parcela 47) foi a que apresentou menor quantidade de biomassa lenhosa, com predominância de indivíduos finos, que ainda proporcionaram uma boa cobertura da área, provocando sombreamento e fazendo com que a biomassa herbácea também não se desenvolvesse, apresentando somente 0,14 Mg ha⁻¹ de biomassa herbácea. Além de apresentar a menor refletância observada para a maioria das bandas do sensor MSI/Sentinel-2 (Figura 26 B). O modelo utilizando somente dados Sentinel-1, 1HA, não melhorou seu desempenho após os ajustes.

Os modelos para obtenção da biomassa lenhosa na estação chuvosa e biomassa total utilizando somente dados Sentinel-2 foram os que apresentaram melhor desempenho, com estruturas bastante semelhantes, contanto com as mesmas variáveis, porém há uma variação nos valores dos coeficientes associados a cada uma (Quadro 1). Para o melhoramento dos modelos foi retirado o mesmo outlier (parcela 46), indicando a forte influência do compartimento de biomassa lenhosa sobre a biomassa total, pois, como já foi expresso anteriormente, a biomassa lenhosa representa em média 99% da biomassa total de uma área.

Quanto aos modelos gerados com imagens obtidas durante a estação seca, a retirada da parcela 41, resultou nos modelos ajustados 12LSA e 2LSA, ambos com desempenho

superior aos modelos iniciais. Observa-se na Figura 26 C que esta parcela apresentou um pico de refletância em todas as bandas do sensor MSI/Sentinel-2, diferenciando-se das demais com quantidades de biomassa semelhantes.

Os modelos ajustados obtidos passaram pelo processo de validação cruzada. Na tabela 8 são apresentados os coeficientes de determinação predito (R^2_{pred}), que foi usado na análise de validação de regressão para indicar quão bem o modelo prevê respostas para novas observações. R^2_{pred} varia entre 0 % e 100 % e sua base de cálculo é sobre a estatística PRESS. A *Predicted Residual Error Sum of Squares* (PRESS) é uma medida do desvio entre os valores ajustados e os valores observados, ela é um tipo de somatório do quadrados dos resíduos, na qual cada observação do conjunto de dados é removida sistematicamente, estimando a equação de regressão, e determinando o quão bem o modelo prediz a observação removida.

Tabela 8 – Validação dos Modelos de Regressão

| Código do modelo | R^2_{pred} (%) |
|-------------------------|---|
| 12LCA | 71,23 |
| 1LCA | 32,45 |
| 2LCA | 71,23 |
| 12HA | 43,04 |
| 1HA | 18,30 |
| 2HA | 43,04 |
| 12TA | 70,47 |
| 1TA | 32,45 |
| 2TA | 71,23 |
| 12LSA | 52,11 |
| 1LSA | 27,69 |
| 2LSA | 52,11 |

Fonte: Autora

Os modelos 12LCA e 2LCA para biomassa lenhosa na estação chuvosa e 2TA para biomassa total foram os que apresentaram maior R^2_{pred} , ambos com 71,23%, o que representa uma boa capacidade de predição desses modelos. Aqueles desenvolvidos também para biomassa lenhosa com imagens da estação seca, 12LSA e 1LSA apresentaram desempenho na

validação pouco inferior aos modelos com os mesmos dados de sensoriamento remoto na estação chuvosa, com R^2_{pred} de 52,11% para ambos (Tabela 8).

Em relação aos modelos desenvolvidos para prever a biomassa herbácea, o maior R^2_{pred} foi dos modelos 12HA e 2HA que são iguais por contarem somente com variáveis Sentinel-2. Quanto aos modelos de biomassa total, o modelo 2TA obteve o mesmo valor de R^2_{pred} (71,23%) que os modelos 12LCA e 2LCA, por apresentarem a mesma estrutura, se consolidando como os modelos com melhor desempenho na calibração e validação.

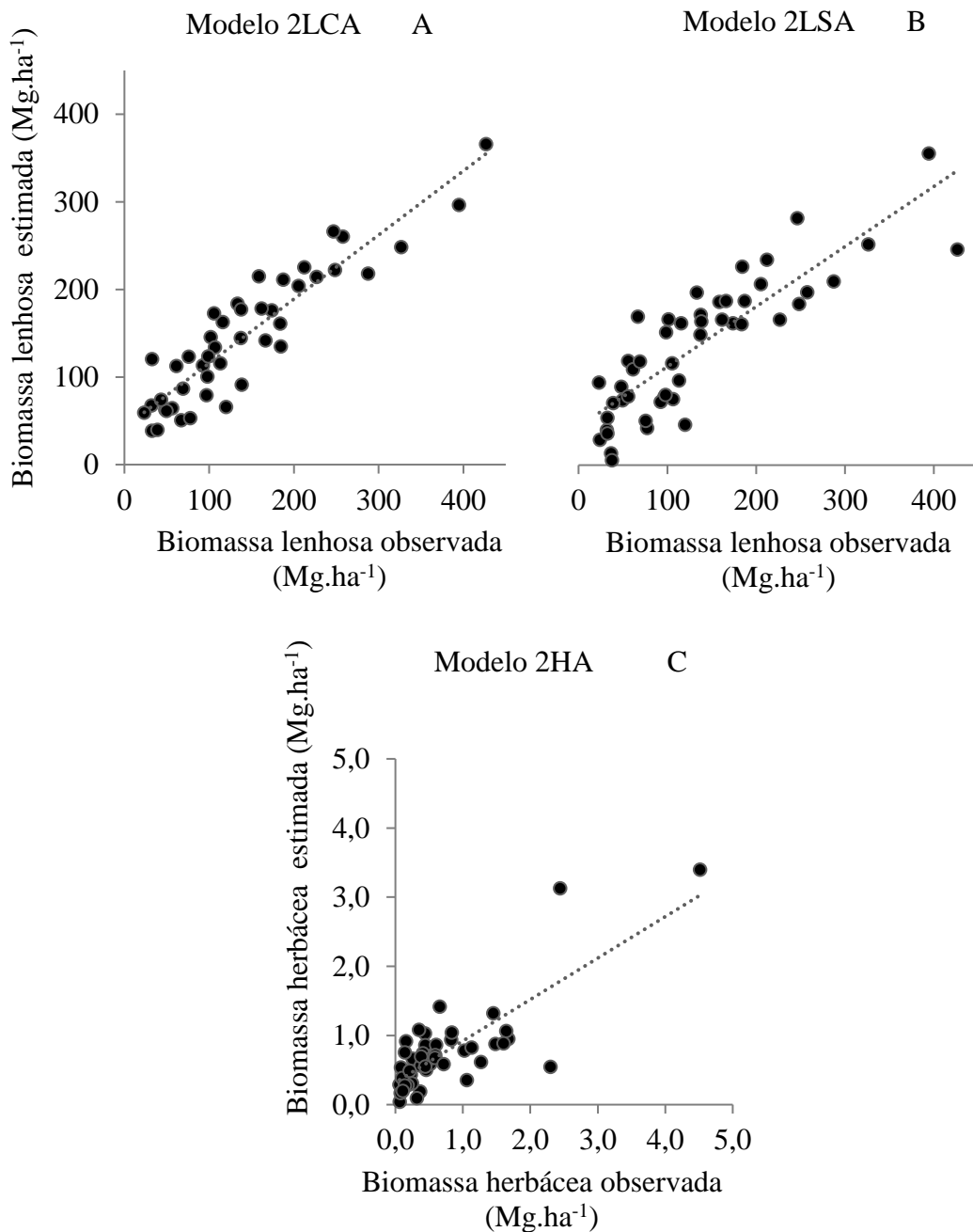
Cada compartimento de biomassa obteve então seu melhor modelo de regressão linear múltipla ajustado e validado. Para biomassa lenhosa na estação chuvosa o melhor modelo foi o 2LCA, este modelo apresentou na calibração e validação desempenho superior ao modelo 1LCA. O modelo 2LSA foi o melhor modelo para prever biomassa lenhosa na estação seca também com parâmetros de desempenho superiores ao modelo 1LSA.

Para biomassa herbácea, o melhor modelo foi o S2HA, que utiliza somente dados Sentinel-2. E em relação a biomassa total, o melhor modelo foi o 2TA, devido a diferença de desempenho na calibração e validação em relação aos demais modelos gerados para esse compartimento.

Quanto aos modelos ajustados para estimativa da biomassa apresentados detalhadamente no Quadro 1, nota-se grande semelhança entre o modelo de biomassa lenhosa 2LSA e o modelo de biomassa total 2TA que apresentam as mesmas variáveis explicativas, porém parâmetros pouco diferentes, isso, conforme já analisado anteriormente se deve a contribuição do compartimento de biomassa lenhosa na total. Devido a tais semelhanças é redundante utilizar os dois modelos separadamente, logo, selecionou-se o modelo 2LCA para estimar tanto a biomassa lenhosa como a total.

Considerando os melhores modelos para predição da biomassa: 2LCA = Modelo de biomassa lenhosa na estação chuvosa com dados Sentinel-2 ajustado; 2HA = Modelo de biomassa herbácea com dados Sentinel-2 ajustado; e 2LSA = Modelo de biomassa lenhosa na estação seca com dados Sentinel-2 ajustado. A Figura 29 mostra a relação entre os valores preditos de biomassa por cada modelo e os valores observados em campo, seja através de equação alométrica para biomassa lenhosa, como por corte e pesagem para a biomassa herbácea.

Figura 29 – Dispersão entre os valores preditos pelos modelos desenvolvidos e a biomassa observada em campo. Modelo para estimativa de biomassa lenhosa na estação chuvosa (A); modelo para a estimativa da biomassa lenhosa na estação seca (B); e modelo para estimativa de biomassa herbácea (C).



Fonte: Autora

Em todos os modelos, o erro na predição foi crescendo à medida que a biomassa aumentava, tanto para valores elevados de biomassa lenhosa, como herbácea. Em relação ao

modelo 2LCA (Figuras 29 A), apesar de ter tendência a subestimar a biomassa nesse patamar, ainda se apresentam como bons preditores para valores acima de 300 Mg ha⁻¹. No entanto, o modelo 2HA (Figura 29 C), desenvolvido para estimar a biomassa herbácea, superestimou ela em parcelas com valores elevados, logo, o intervalo de aplicação deste modelo para seu melhor desempenho varia de 0,11 Mg ha⁻¹ até 3,0 Mg ha⁻¹.

5.5 Mapeamento da biomassa

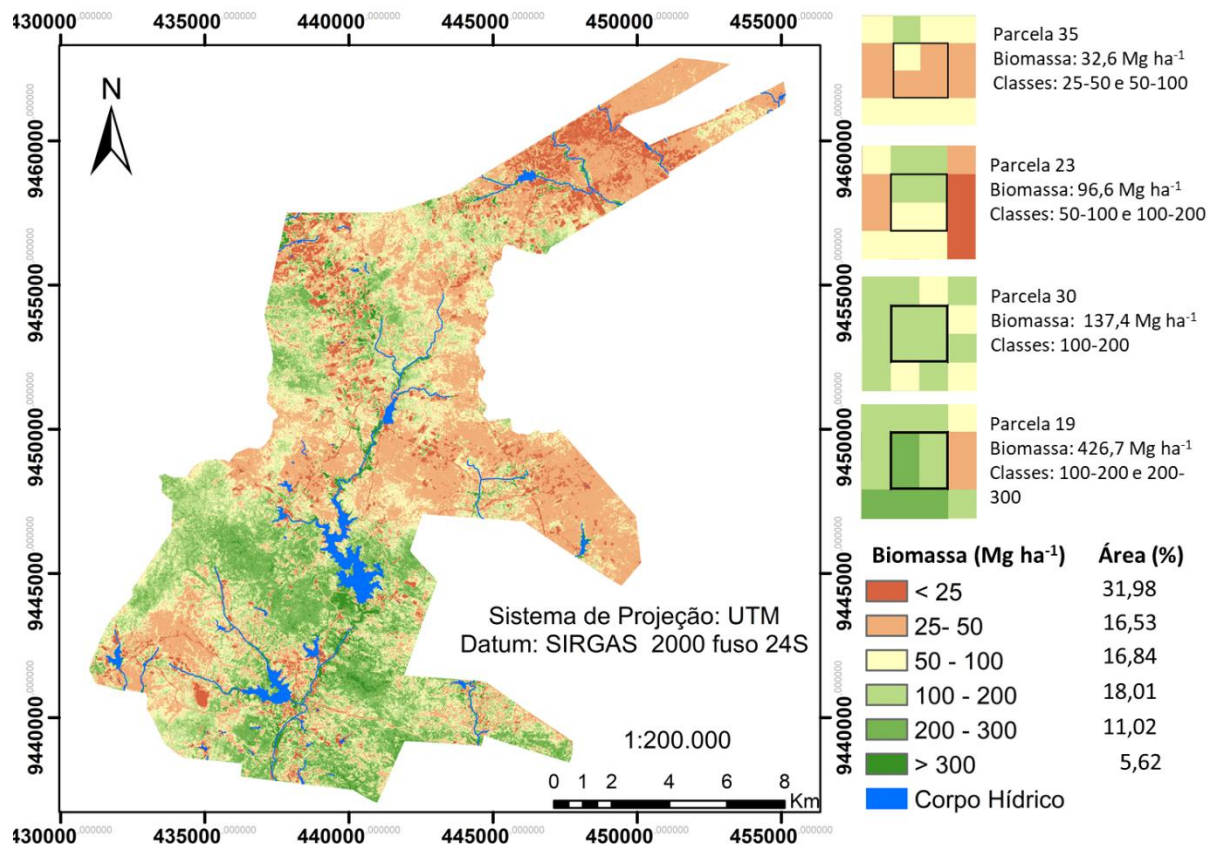
Os modelos finais após todo o processo de ajuste e validação estão aptos para serem usados na estimativa e mapeamento da biomassa acima do solo em toda a área de estudo, incluindo as diversas fisionomias da vegetação da Caatinga. Cada variável dos modelos foi obtida por meio do processamento das imagens Sentinel-2, seja na estação chuvosa como na seca e utilizando a ferramenta álgebra de mapas tais variáveis foram inseridas no modelo resultando na estimativa de biomassa lenhosa na estação chuvosa (Figura 30), biomassa lenhosa na estação seca (Figura 32) e biomassa herbácea (Figura 33). Considerando que a biomassa lenhosa na estação chuvosa representa 99% da biomassa total e os melhores modelos gerados para esses compartimentos apresentam estruturas iguais com coeficientes muito semelhantes, foi apresentada abaixo somente a distribuição espacial da primeira, pois seria redundante apresentar a distribuição espaciais das duas por serem praticamente iguais.

A biomassa média do Assentamento 25 de Maio estimada pelo modelo 2LCA com imagens da estação chuvosa foi de 121,85 Mg ha⁻¹, valor esse bastante semelhante ao medido em campo de 130,92 Mg ha⁻¹. A aplicação de modelos desenvolvidos em estudos anteriores na área mesma área demonstrou que estes não são adequados para obter a biomassa em FTSS. O modelo desenvolvido por Almeida *et al.* (2017) em área de floresta tropical, na região Amazônica do Brasil resultou em uma biomassa média de 3.535,45 Mg ha⁻¹, cerca de 27 vezes maior que valor médio de biomassa da vegetação da Caatinga medida em campo. O modelo de Punalekar *et al* (2017) proposto para áreas de pastagens também resultou em valores muito superiores aos reais, cuja biomassa média estimada foi de 1.871,61 Mg ha⁻¹. Já o modelo de Chen *et al.* (2018) desenvolvido para a estimativa da biomassa de arbustos acima do solo em regiões áridas e semiáridas no Mu Us Sandland na China subestimou a biomassa lenhosa, com média de 45,45 Mg ha⁻¹, porém foi o que mais se aproximou do valor obtido em campo, devido a semelhança fisionômica das vegetações estudadas.

De acordo com a distribuição espacial da biomassa lenhosa obtida a partir do modelo 2LCA, com imagens da estação chuvosa, áreas com biomassa lenhosa inferior a 25 Mg

ha⁻¹ representam quase um terço (31,98%) do território do Assentamento 25 de Maio (Figura 30). Isso porque incluem tanto as áreas com alto grau de antropização, como vilas de moradores, áreas desmatadas para produção de pastos, para a produção agrícola e estradas, mas também áreas vegetadas naturalmente com pouca biomassa, como rochedos e áreas muito íngremes.

Figura 30 – Distribuição espacial da biomassa lenhosa no Assentamento 25 de Maio pelo modelo 2LCA, que tem como base imagens MSI/Sentinel-2 durante a estação chuvosa.



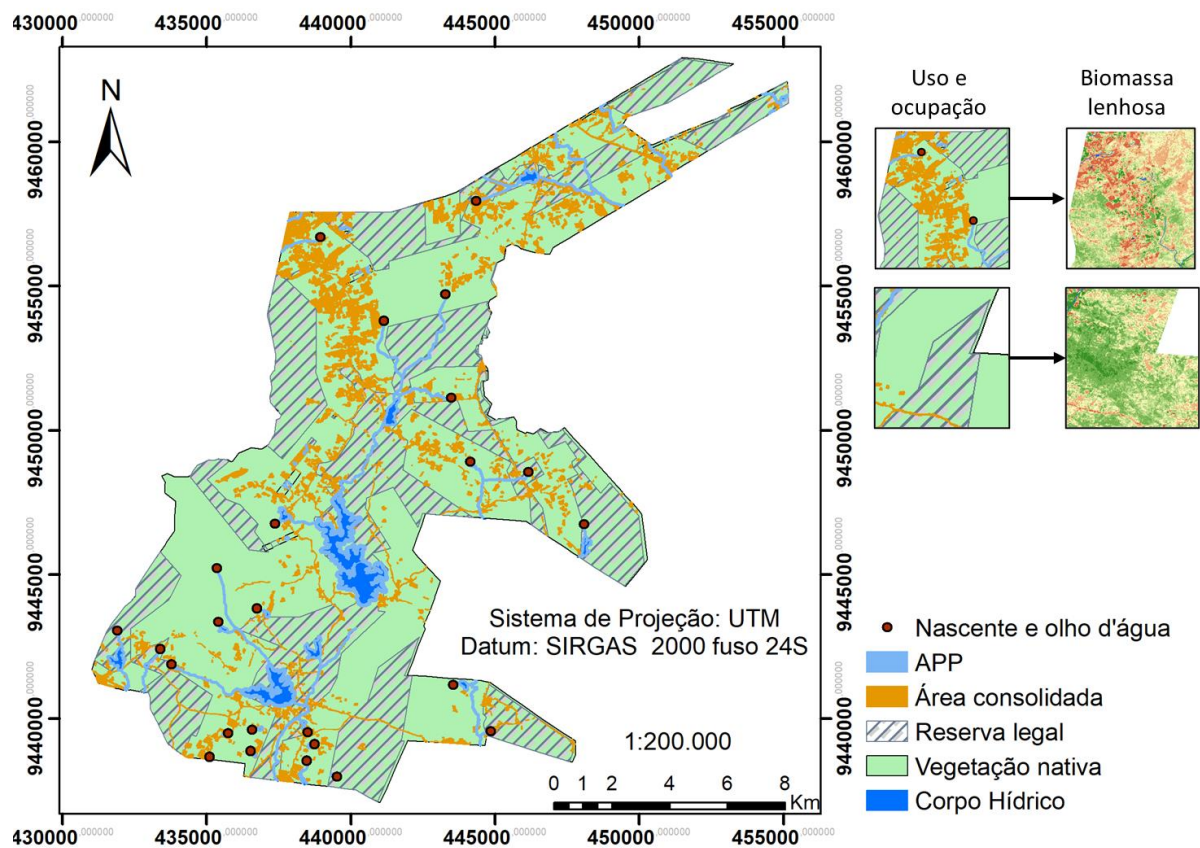
Fonte: Autora

As demais áreas, que representam ou outros dois terços do território possuem biomassa acima de 25 Mg ha⁻¹ chegando a quantidades superiores a 400 Mg ha⁻¹, conforme foi medido em campo durante esta pesquisa. Os locais com muita biomassa lenhosa são mais afastados das vilas de moradores, em geral são áreas de reserva definidas pelo INCRA ou lotes dos assentados com pouco ou nenhum uso (Figura 30).

Comparando a distribuição espacial da biomassa lenhosa com o uso e ocupação do solo de acordo com o Cadastro Ambiental do Rural - CAR do Assentamento 25 de Maio (Figura 31), observa-se que nas áreas consolidadas, caracterizadas pela ocupação antrópica que incluem edificações, benfeitorias ou atividades agrossilvipastoris há notoriamente uma menor

quantidade de biomassa, conforme é destacado na Figura 31. Enquanto que nas áreas de vegetação nativa que são também reservas legais há mais biomassa. No entanto, é possível notar no quadrante delimitado pelos pares de coordenadas E 445000, N 9450000; E 450000, N 9450000; E 445000, N 9445000; E 450000, N 9445000, destacado no mapa abaixo que áreas de reserva legal também podem apresentar valores de biomassa semelhantes a áreas consolidadas, isso porque apesar do uso indicado da terra ser a preservação, ela acaba sendo utilizada pelos moradores para fins de produção de lenha e principalmente pastoreio de animais ocasionando uma redução em sua biomassa.

Figura 31 – Uso e ocupação do território do Assentamento 25 de Maio de acordo com o Cadastro Ambiental Rural – CAR.



Fonte: Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural - SICAR (2020)

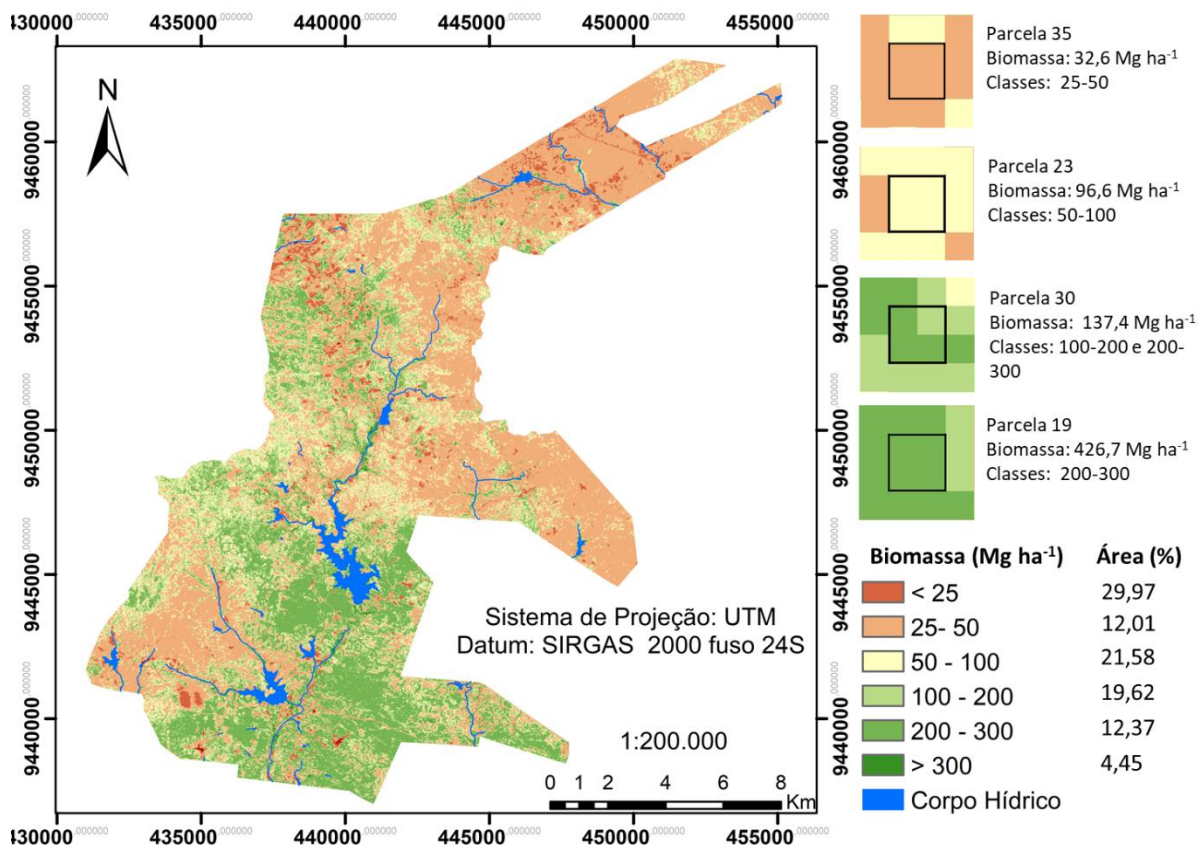
Em termos de produção de biomassa lenhosa para fins energéticos por meio do manejo florestal sustentável, as áreas com biomassa superior a 100 Mg ha^{-1} resultam em um total de 1.706.811,12 Mg, considerando a taxa de regeneração, a idade técnica de corte de 17,3 anos (CARVALHO *et al*, 2020) e uma exploração de somente 70% dessa vegetação, a produção

anual sustentável seria de 69.061,72 Mg ano⁻¹, que de acordo com Brand (2017) permitem a implantação de uma termelétrica com capacidade de geração de 3,58 MWh de energia elétrica.

Apesar do melhor modelo para a estimativa da biomassa lenhosa ser baseado em imagens da estação chuvosa, sabe-se que devido a condições climáticas é ser difícil encontrar imagens sem nuvens para aplicar o modelo, logo, também foi desenvolvido o modelo 2LSA que utiliza imagens da estação seca. A distribuição espacial de biomassa lenhosa gerada pelo modelos (Figura 32) é semelhante com a do modelo com imagens da estação chuvosa 2LCA (Figura 30), apresentando as mesmas áreas com as maiores e as menores quantidades de biomassa, onde a diferença somente pode ser observada em escalas de trabalho mais detalhadas.

Logo, para estudos relacionados ao planejamento ambiental em escalas regionais, como a estimativa de produtividade primária, do estoque e sequestro do carbono, o modelo 2LSA pode ser utilizado sem prejuízos as análises dele resultantes. Porém, quando se deseja obter valores mais precisos, como para estimativa de produção energética e matéria prima para os mais diversos fins, o modelo 2LCA, com imagens da estação chuvosa é mais adequado.

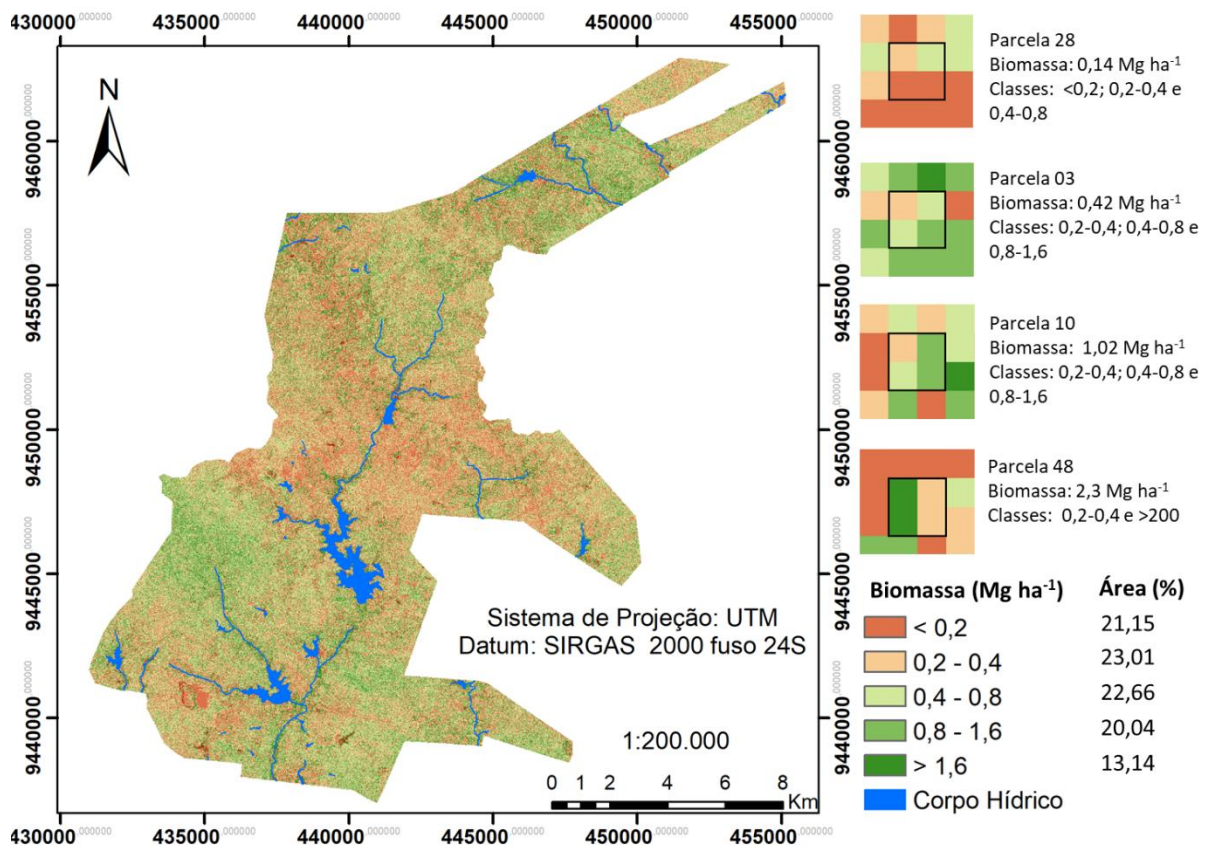
Figura 32 – Distribuição espacial da biomassa lenhosa no Assentamento 25 de Maio pelo modelo 2LSA, que tem como base imagens MSI/Sentinel-2 durante a estação seca.



Fonte: Autora

O modelo final para estimativa da biomassa herbácea (2HA), resultou em uma distribuição espacial homogênea, sem relação com a biomassa lenhosa, onde todas as áreas apresentam quantidades semelhantes de biomassa, isso porque não há dominância de uma classe de quantidade de biomassa em uma área específica, tais classes estão distribuídas quase que uniformemente pelo território do assentamento, com identificação geral de áreas preservadas e antropizadas (Figura 33).

Figura 33 – Distribuição espacial da biomassa herbácea no Assentamento 25 de Maio pelo modelo 2HA, que tem como base imagens do sensor MSI/Sentinel-2 durante a estação chuvosa.



Fonte: Autora

Considerando que a Figura 33 diz respeito a biomassa herbácea do mês de maio, no qual a produtividade é máxima e que esse tipo de vegetação tem ocorrência sazonal, então os quantitativos obtidos por esse mapeamento são equivalentes produtividade anual de forragem nativa para consumo de animais. Logo, excluídas as áreas com biomassa herbácea inferior a $0,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, a produtividade anual estimada é de $0,65 \text{ Mg ha}^{-1}$, próximo ao valor medido em campo de $0,70 \text{ Mg ha}^{-1}$. Tendo em conta somente 70% do valor da produtividade anual, essa quantidade

de biomassa tem capacidade de sustentar 4.305 Unidade Animal UA durante os 6 meses da estação chuvosa (janeiro a junho), que equivalem a 4.305 vacas com 450 Kg de peso vivo (SANTOS, *et al*, 2002).

6 CONCLUSÕES

O diâmetro do caule das árvores e a suas respectivas áreas basais são os parâmetros fistossociológicos mais fortemente relacionados com a biomassa lenhosa. Nesse sentido, as principais espécies que contribuem para a biomassa em área de Floresta Tropical Sazonalmente Seca – FTSS são: *Auxemma oncocalyx* e *Caesalpinia pyramidalis*, (vulgarmente conhecidas como Pau-branco e Caatingueira) por serem as árvores de grande porte, com os maiores diâmetros e ocorrência frequente e a *Croton sonderianus* (popularmente chamada de Marmeleiro) que apesar de ser uma espécie de pequeno porte tem ocorrência muito frequente.

Em áreas de Caatinga Arbórea, a biomassa lenhosa tende a ser duas vezes maior que em áreas de Caatinga Arbustiva Densa e quatro vezes maior que áreas de Caatinga Arbustiva Aberta. Nessa última, há predominância de espécies pioneiras, indicando estágio inicial de sucessão e nas outras áreas há mais indivíduos do grupo ecológico das intermediárias iniciais, demonstrando estágio intermediário de sucessão ecológica. De modo geral, a vegetação nativa do Assentamento 25 de maio se encontra em estágio intermediário de sucessão ecológica.

O aumento da rugosidade da superfície está diretamente relacionado com a quantidade de biomassa lenhosa, logo, à medida que a biomassa aumenta o valor do coeficiente de retroespalhamento do radar SAR-C/Sentinel-1 também se eleva para ambas as polarizações (VV e VH). Além disso, o comportamento espectral do radar pouco varia entre as estações do ano, assim, a presença das folhas na vegetação durante a estação chuvosa não interfere consideravelmente na resposta do radar, indicando que a interação do sinal ocorre principalmente com os galhos e troncos.

As bandas *red-edge* do sensor MSI/Sentinel-2 são as que apresentam melhor relação com a biomassa lenhosa durante a estação chuvosa. No entanto, para estação seca, as bandas SWIR são melhores preditores. Em ambas as estações, a partir de 40 Mg ha⁻¹ de biomassa lenhosa, ocorre a saturação do sinal.

O processo de calibração dos modelos de regressão linear múltipla para obtenção da biomassa, demonstrou que as bandas *red-edge* e seus índices derivados são bons preditores para todos os compartimentos de biomassa, em qualquer época do ano. Quanto as imagens utilizadas, aquelas da estação chuvosa resultam em modelos melhores que as da estação seca, devido à presença de folhas verdes na vegetação, que facilita a identificação de diferentes quantidades de biomassa.

A aplicação dos modelos gerados em área de FTSS, demonstrou que aqueles desenvolvidos para biomassa lenhosa com imagens de ambas as estações do ano conseguem

identificar as diferentes fisionomias da Caatinga e suas respectivas quantidades de biomassa e principalmente distinguir a vegetação dos demais usos do solo. Quanto ao modelo desenvolvido para estimar biomassa herbácea todas as áreas apresentam quantidades semelhantes cuja espacialização apresentou-se homogênea com identificação genérica das áreas preservadas e antropizadas. Logo, os modelos gerados são capazes de prever a biomassa herbácea e lenhosa para qualquer estação do ano em área de Floresta Tropical Sazonalmente Seca.

REFERÊNCIAS

- AHAMED, T. *et al.* A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass and bioenergy**, [S.I], v. 35, n. 7, p. 2455-2469, 2011.
- ALI, I. *et al.* Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data. **Remote Sensing**, [S.I], v. 7, n. 12, p. 16398-16421, 2015.
- ALMEIDA, C. L. **Relações solo-planta-atmosfera em caatinga preservada: o caso da bacia experimental de aiuaba**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.
- ALMEIDA, A. Q.; GONÇALVES, F. G.; TREUHAFT, R. N.; SANTOS, J. R. GRAÇA, P. M. L. A.; VIEGAS, R. R. Modelos de estimativa de biomassa aérea utilizando dados RapidEye para a Floresta Nacional do Tapajós-PA. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, SP, 2017.
- ALVES, A. R. *et al.* Quantificação de biomassa e ciclagem de nutrientes em áreas de vegetação de caatinga no município de Floresta, Pernambuco. **Sapiência**, Iporá, GO, v. 1, p. 10, 2012.
- ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B. Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v. 27, p. 683-690, 2007.
- ARAÚJO FILHO, J. **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Recife, PE: Projeto Dom Helder Camara, 2013.
- ASHRAF, M. A.; MAAH, M. J.; YUSOFF, I. Introduction to remote sensing of biomass. In: **Biomass and Remote Sensing of Biomass**. IntechOpen: Londres, Reino Unido, 2011.
- ASTOLA, H. *et al.* Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 223, p. 257-273, 2019.
- BATTUDE, M. *et al.* Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 184, p. 668-681, 2016.
- BARRACHINA, M.; CRISTÓBAL, J.; TULLA, A. F. Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.I], v. 38, p. 184-192, 2015.
- BECKNELL, J. M.; KUCEK, L. K.; POWERS, J. S. Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis. **Forest Ecology and Management**, [S.I], v. 276, p. 88-95, 2012.
- BIRDSEY, R. A. Carbon Accounting Rules and Guidelines for the United States Forest Sector. **Journal of Environmental Quality**, [S.I], v. 35, p. 1518-1524, 2006.

BOUVET, A. *et al.* An above-ground biomass map of African savannahs and woodlands at 25 m resolution derived from ALOS PALSAR. **Remote sensing of environment**, [S.I], v. 206, p. 156-173, 2018.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. Uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, [S.I], v. 13, p. 75-81, 2007.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, [S.I], v. 45, p. 5–32, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Food & Agriculture Org., [S.I], 1997.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.; PAIVA, J. A.; D'AGE, J. C. L.; **Geoprocessamento: Teoria e Aplicações**. Edição *On-line*: INPE. v. 1, 1999.

CARVALHO, E. C. D.; SOUZA, B. C.; TROVÃO, D. M. B. M. Ecological succession in two remnants of the Caatinga in the semi-arid tropics of Brazil. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, RS, v. 10, n. 1, p. 13, 2012.

CARVALHO, A. C. *et al.* Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 48, n. 126, 2020.

CASTILLO, J. A. A. *et al.* Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.I], v. 134, p. 70-85, 2017.

GOMÉZ, M. G. C. Joint use of Sentinel-1 and Sentinel-2 for land cover classification: A machine learning approach. **Lund University GEM thesis series**, Sölvegatan, Suécia, 2017.

CERQUEIRA, D. B.; ROCHA, W. F. Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga: estudo de caso em Rio das Contas – BA. In: **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos, SP v.13, p. 2413-2419, 2007

CARREIRAS, J. M. B.; VASCONCELOS, M. J.; LUCAS, R. M. Understanding the relationship between aboveground biomass and ALOS PALSAR data in the forests of Guinea-Bissau (West Africa). **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 121, p. 426-442, 2012.

CHAND, T. R. K.; BADARINATH, K. V. S. Quantification of trace gas emissions from shifting cultivation areas using remote sensing and ground-based measurements. **Current Science**, Índia, v. 92, n. 7, p. 891-894, 2007

CHAVES, I. B. *et al.* Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. **Revista Caatinga**, Rio Grande do Norte, v. 21, n. 2, p. 204-213, 2008.

- CHAVE, J. *et al.* Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, [S.I], v. 359, n. 1443, p. 409-420, 2004.
- CHEN, J.C.; YANG, C.M.; WU, S.T.; CHUNG, Y.L.; CHARLES, A.L.; CHEN, C.T. Leaf chlorophyll content and surface spectral reflectance of tree species along a terrain gradient in Taiwan's Kenting National Park. **Botanical Studies**, [S.I], v.48, p.71–77, 2007.
- CHEN, W.; CAO, C.; TIAN, H.; ZHAO, J. Shrub biomass estimation in semi-arid sandland ecosystem based on remote sensing technology. **Global Ecology and Conservation**, [S.I], v. 16, 2018.
- CHO, M. A.; SKIDMORE, A. K. Hyperspectral predictors for monitoring biomass production in Mediterranean mountain grasslands: Majella National Park, Italy. **International Journal of Remote Sensing**, [S.I], v. 30, n. 2, p. 499-515, 2009.
- COHEN, W. B. *et al.* An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 84, n. 4, p. 561-571, 2003.
- CONRADO, J. A. A. **Biomassa herbácea e biodiversidade da Caatinga submetida a diferentes raleamentos e enriquecimentos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2017.
- CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote sensing of environment**, [S.I], v. 30, n. 3, p. 271-278, 1989.
- DANG, A. T. N. *et al.* Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam. **Ecological Informatics**, [S.I], v. 50, p. 24-32, 2019.
- DEB, D. *et al.* An alternative approach for estimating above ground biomass using Resourcesat-2 satellite data and artificial neural network in Bundelkhand region of India. **Environmental monitoring and assessment**, [S.I], v. 189, n. 11, p. 576, 2017
- DONG, T. *et al.* Estimating winter wheat biomass by assimilating leaf area index derived from fusion of Landsat-8 and MODIS data. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, [S.I], v. 49, p. 63-74, 2016.
- DUBE, T.; MUTANGA, O. Evaluating the utility of the medium-spatial resolution Landsat 8 multispectral sensor in quantifying aboveground biomass in uMgeni catchment, South Africa. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.I], v. 101, p. 36-46, 2015.
- DUBE, T. *et al.* Intra-and-inter species biomass prediction in a plantation forest: testing the utility of high spatial resolution spaceborne multispectral rapideye sensor and advanced machine learning algorithms. **Sensors**, [S.I], v. 14, n. 8, p. 15348-15370, 2014.
- DUCKE, A. **Estudos botânicos no Ceará**. Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Coordenadoria de Estudo de Problemas Brasileiros, 1959.

DRUSCH, M. *et al.* Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote sensing of Environment**, [S.I], v. 120, p. 25-36, 2012.

ENGLHART, S.; KEUCK, V.; SIEGERT, F. Aboveground biomass retrieval in tropical forests—The potential of combined X-band L-band SAR data use. **Remote sensing of environment**, [S.I], v. 115, n. 5, p. 1260-1271, 2011.

ESA. **Spatial Resolution**. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>. Acesso em: 18 mar 2019.

FRAMPTON, W. J. *et al.* Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, [S.I], v. 82, p. 83-92, 2013.

FERNÁNDEZ-MANSO, A. ; FERNÁNDEZ-MANSO, O.; QUINTANO, C. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, [S.I], v. 50, p. 170-175, 2016.

FERNANDES, A. **Fitogeografia brasileira: províncias florísticas**. Fortaleza: Realce, 2006.

FELDPAUSCH, T. R. *et al.* Height-diameter allometry of tropical forest trees. **Biogeosciences**, [S.I], 2011.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, J. A. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, Pernambuco, v. 16, n. 1, p. 160-185, 2010.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

FORKUOR, G. *et al.* Landsat-8 vs. Sentinel-2: examining the added value of sentinel-2's red-edge bands to land-use and land-cover mapping in Burkina Faso. **GIScience & remote sensing**, [S.I], v. 55, n. 3, p. 331-354, 2018.

GAO, Y. *et al.* Adaptive neural network based on segmented particle swarm optimization for remote-sensing estimations of vegetation biomass. **Remote sensing of environment**, [S.I], v. 211, p. 248-260, 2018.

GANDOLFI, S.; LEITÃO, H. F.; BEZERRA, C. L. F. Levantamento florístico e caráter sucessional das espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta mesófila semidecídua no município de Guarulhos, SP. **Revista brasileira de biologia**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 753-767, 1995.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Spectral reflectance changes associate with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal of Plant Physiology**, [S.I], v. 143, 1994.

GHOSH, S. M.; BEHERA, M. D. Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. **Applied Geography**, [S.I], v. 96, p. 29-40, 2018.

GLENN, N. F. *et al.* Landsat 8 and ICESat-2: Performance and potential synergies for quantifying dryland ecosystem vegetation cover and biomass. **Remote Sensing of Environment**, [S.I.], v. 185, p. 233-242, 2016.

GUEDES, R. S. *et al.* Caracterização florístico-fitossociológica do componente lenhoso de um trecho de caatinga no semiárido paraibano. **Revista Caatinga**, Rio Grande do Norte, v. 25, n. 2, p. 99-108, 2012.

HAGOLLE, O. *et al.* SPOT-4 (Take 5): Simulation of Sentinel-2 time series on 45 large sites. **Remote Sensing**, [S.I.], v. 7, n. 9, p. 12242-12264, 2015.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 6ª. ed. Porto Alegre, Bookman, 2009.

HIGA, R. C. V. *et al.* Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. **Embrapa Pecuária Sudeste-Documentos (INFOTECA-E)**, 2014.

HIGUCHI, N. *et al.* Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, Brasil, v. 34, n. 3, 2004.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. **Seminário Emissão x Sequestro de CO₂: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil**, p. 125-153, 1995.

HILL, M. J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated SENTINEL 2 data for a North American transect. **Remote Sensing of Environment**, [S.I.], v. 137, p. 94-111, 2013.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Principal Component Analysis: theory, interpretations and applications. **Engineering and Science**, [S.I.], v. 5, n. 1, p. 83-90, 2015.

HUANG, X. *et al.* Assessment of Forest above Ground Biomass Estimation Using Multi-Temporal C-band Sentinel-1 and Polarimetric L-band PALSAR-2 Data. **Remote Sensing**, [S.I.], v. 10, n. 9, p. 1424, 2018.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, [S.I.], v.25, p.295–309, 1988.

IMHOFF, M. L. Theoretical analysis of the effect of forest structure on synthetic aperture radar backscatter and the remote sensing of biomass. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S.I.], v. 33, p. 341-352, 1995.

IPECE. **Perfil Municipal 2017-Madalena**. O Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE, 2018. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Madalena_2017.pdf>. Acesso em: 03 de dez de 2018.

JANSSEN, L. L. F.; HUURNEMAN, G. C. Principles of remote sensing: an introductory textbook. **ITC Educational Textbook Series**, Enschede, Países Baixos, v. 2, 2001.

JOLLIFFE, I. **Principal Component Analysis**. 2ª edição. Springer: Verlag Nova York, 2002.

JONES, H. G.; VAUGHAN, R. A. **Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications**. Oxford University Press, 2010.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, [S.I], v.50, p. 663–666, 1969.

KAURANNE, T. *et al.* LiDAR-assisted multi-source program (LAMP) for measuring above ground biomass and forest carbon. **Remote Sensing**, [S.I], v. 9, n. 2, p. 154, 2017.

KARLSON, M. *et al.* Mapping tree canopy cover and aboveground biomass in Sudano-Sahelian woodlands using Landsat 8 and random forest. **Remote Sensing**, [S.I], v. 7, n. 8, p. 10017-10041, 2015.

KLASS, D. L. **Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals**. Academic Press, 1998.

KOGAN, F. *et al.* Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. **International Journal of Remote Sensing**, [S.I], v. 25, n. 14, p. 2889-2896, 2004.

KROSS, A. *et al.* Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.I], v. 34, p. 235-248, 2015.

LAURIN, G. V. *et al.* Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. **Journal of Applied Remote Sensing**, [S.I], v. 12, n. 1, p. 016008, 2018.

LI, Z.; GUO, X. Non-photosynthetic vegetation biomass estimation in semiarid Canadian mixed grasslands using ground hyperspectral data, Landsat 8 OLI, and Sentinel-2 images. **International journal of remote sensing**, [S.I], v. 39, n. 20, p. 6893-6913, 2018.

LI, F. *et al.* Estimating grassland aboveground biomass using multitemporal MODIS data in the West Songnen Plain, China. **Journal of Applied Remote Sensing**, [S.I], v. 7, n. 1, p. 073546, 2013.

LIMA JÚNIOR *et al.* Estimation of " caatinga" woody biomass using allometric equations and vegetation index. **Scientia Forestalis**, Piracicaba -SP, v. 42, n. 102, p. 289-298, 2014.

LIMA, B. G.; COELHO, M. de F. B. Estrutura do componente arbustivo-arbóreo de um remanescente de caatinga no estado do Ceará, Brasil. **Cerne**, Lavras – MG, v. 21, n. 4, p. 665-672, 2015.

LORENZZETTI, J. A. Princípios físicos de sensoriamento remoto. **São Paulo: Blucher**, 2015.

LUETZELBURG, P. V. **Estudo botânico do Nordeste**. Rio de Janeiro: Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas, v.3, n.57, Série 1-A, p.197-250, 1922.

- LU, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International journal of remote sensing**, [S.I], v. 27, n. 7, p. 1297-1328, 2006.
- MCNAIRN, H.; SHANG, J. A review of multitemporal synthetic aperture radar (SAR) for crop monitoring. In: **Multitemporal Remote Sensing**. Springer, Cham, 2016. p. 317-340.
- MCNAIRN, H.; PROTZ, R. Mapping corn residue cover on agricultural fields in Oxford County, Ontario, using Thematic Mapper. **Canadian Journal of Remote Sensing**, [S.I], v. 19, n. 2, p. 152-159, 1993.
- MARIOTTO, I. *et al.* Hyperspectral versus multispectral crop-productivity modeling and type discrimination for the HypSIRI mission. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 139, p. 291-305, 2013.
- MARSHALL, M.; THENKABAIL, P. Advantage of hyperspectral EO-1 Hyperion over multispectral IKONOS, GeoEye-1, WorldView-2, Landsat ETM+, and MODIS vegetation indices in crop biomass estimation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.I], v. 108, p. 205-218, 2015.
- MARTIMORT, P. *et al.* Sentinel-2 optical high resolution mission for GMES operational services. In: **2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, 2007.
- MEA. **Current state & trends assessment: Dryland systems**. World Resources Institute, Washington, In: Millennium Ecosystem Assessment, 2005.
- MEDEIROS, F. S. *et al.* Florística, fitossociologia e modelagem da distribuição diâométrica em um fragmento de Caatinga em São Mamede-PB. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Brasil, v.14, n. 2, p.85-95, 2018.
- MERZLYAK, M. N. *et al.* Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia plantarum**, [S.I], v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999.
- MITCHARD, E. T. A. *et al.* Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: A consistent relationship across four different African landscapes. **Geophysical Research Letters**, [S.I], v. 36, n. 23, 2009.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ª ed., UFV, 2007.
- MORAIS, Y. C. B. *et al.* Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasil, v. 32, n. 4, p.585-599, 2017.
- MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. Ecology of tropical dry forest. **Annual review of ecology and systematics**, [S.I], v. 17, n. 1, p. 67-88, 1986.
- MUTANGA, O.; ADAM, E.; CHO, M. A. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression

algorithm. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.I.], v. 18, p. 399-406, 2012.

NAIDOO, L. *et al.* Estimating above ground biomass as an indicator of carbon storage in vegetated wetlands of the grassland biome of South Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.I.], v. 78, p. 118-129, 2019.

NAKAI, E. S. **Quantificação da biomassa e estoque de carbono em diferentes coberturas vegetais por meio de sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2016.

NAKANO, T. *et al.* Monitoring aboveground biomass in semiarid grasslands using MODIS images. **Journal of Agricultural Meteorology**, [S.I.], v. 69, n. 1, p. 33-39, 2013.

NETER, J., KUTNER, M. H., NACHTSHEIM, C. J., WASSERMAN, W. **Applied Linear Statistical Models**. 4.ed. Boston: McGraw-Hill, 1408 p. 1996.

NOON, C. E.; DALY, M. J. GIS-based biomass resource assessment with BRAVO. **Biomass and Bioenergy**, [S.I.], v. 10, n. 2-3, p. 101-109, 1996.

PALACIO, H. A. Q. *et al.* Dinâmica sazonal da produção de biomassa herbácea em área de gramínea no semiárido do Brasil. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, Fortaleza -CE, v. 13, n. 5, p. 99-104, 2019.

PANDIT, S.; TSUYUKI, S.; DUBE, T. Estimating above-ground biomass in sub-tropical buffer zone community Forests, Nepal, using Sentinel 2 data. **Remote Sensing**, [S.I.], v. 10, n. 4, p. 601, 2018.

PANDEY, U. *et al.* Potential of Envisat ASAR data for woody biomass assessment. **Tropical Ecology**, [S.I.], v. 51, n. 1, p. 117, 2010.

PEREIRA, I. M. *et al.* Regeneração natural em um remanescente de caatinga sob diferentes níveis de perturbação, no agreste paraibano. **Acta Botanica Brasilica**, Brasil, v. 15, n. 3, p. 413-426, 2001.

PEREIRA JÚNIOR, *et al.* Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza – CE, v. 47, n. 1, p. 32-40, 2016.

PERIASAMY, S. Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval: An attempt on Sentinel-1. **Remote Sensing of Environment**, [S.I.], v. 217, p. 537-549, 2018.

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. **Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 2012.**

PHUA, M. H. *et al.* Synergistic use of Landsat 8 OLI image and airborne LiDAR data for above-ground biomass estimation in tropical lowland rainforests. **Forest Ecology and Management**, [S.I.], v. 406, p. 163-171, 2017.

PUNALEKAR, S. M. *et al.* Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 218, p. 207-220, 2018.

QURESHI, A.; PARIVA, R. B.; HUSSAIN, S. A. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. **Environmental Science & Policy**, Exeter, v. 16, p. 81-89, 2012.

RAMOELO, A. *et al.* Monitoring grass nutrients and biomass as indicators of rangeland quality and quantity using random forest modelling and WorldView-2 data. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, [S.I], v. 43, p. 43-54, 2015.

RAMOELO, A. *et al.* Potential of Sentinel-2 spectral configuration to assess rangeland quality. **Journal of applied remote sensing**, [S.I], v. 9, n. 1, p. 094096, 2015.

RAPINEL, S. *et al.* Evaluation of Sentinel-2 time-series for mapping floodplain grassland plant communities. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 223, p. 115-129, 2019.

ROBERTS, M. J.; LONG, S. P.; TIESZEN, L. L.; BEADLE, C. L. Measurement of plant biomass and net primary production of herbaceous vegetation. In: HALL, D. O. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. Springer Science, 1993.

ROSA, G. Q. **Estoque de carbono em diferentes usos da terra e dinâmica das raízes finas em floresta tropical sazonalmente seca**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2018.

ROUSE J. R. J. W. *et al.* Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. **NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md**, [S.I], v. 371, 1973.

ROY, P. S.; RAVAN, S. A. Biomass estimation using satellite remote sensing data—an investigation on possible approaches for natural forest. **Journal of biosciences**, [S.I], v. 21, n. 4, p. 535-561, 1996.

SAATCHI, S. S. *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the national academy of sciences**, [S.I], v. 108, n. 24, p. 9899-9904, 2011.

SIMPLÍCIO, A. V. de O. **Egressos do curso Pedagogia da Terra e suas práticas educativas: um estudo de caso no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará**. 2011, 151 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação da Universidade de Brasília – UnB. 2011. Brasília.

SICAR - **Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural**. Disponível em: <<https://www.car.gov.br/publico/municipios/downloads?sigla=CE>>. Acesso em: 22 de nov de 2020.

ROSA, G. Q. **Estoque de carbono em diferentes usos da terra e dinâmica das raízes finas em floresta tropical sazonalmente seca**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2018.

SANNIER, C. A. D.; TAYLOR, J. C.; PLESSIS, W. Du. Real-time monitoring of vegetation biomass with NOAA-AVHRR in Etosha National Park, Namibia, for fire risk assessment. **International Journal of Remote Sensing**, [S.I], v. 23, n. 1, p. 71-89, 2002.

SHARMA, L.K.; BU, H.; DENTON, A.; FRANZEN, D.W. Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, USA. **Sensors**, [S.I], v.15, p. 27832–27853, 2015.

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

SANTOS, S.A.; COSTA, C.; CRISPIM, S.M.A.; PELLEGRIN, L.A.; RAVAGLIA, E. **Estimativa da capacidade de suporte das pastagens nativas do Pantanal, sub-região da Nhecolândia**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002.

SANTOS, J. C. N. *et al.* Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 18, n. 11, p. 1157-1164, 2014.

SANTOS, W. S. *et al.* Estudo fitossociológico em fragmento de caatinga em dois estágios de conservação, Patos, Paraíba. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Brasil, v. 13, n. 4, p. 305-321, 2017.

SCURLOCK, J. M. O.; PRINCE, S. D. Remote sensing of biomass and productivity. In: **Photosynthesis and production in a changing environment**. Springer, Dordrecht, 1993. p. 22-35.

SIBANDA, M.; MUTANGA, O.; ROUGET, M. Examining the potential of Sentinel-2 MSI spectral resolution in quantifying above ground biomass across different fertilizer treatments. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, [S.I], v. 110, p. 55-65, 2015.

SILVA, A. C. DA C.; PRATA, A. P. DO N.; MELLO, A. A. DE. Florística, fitossociologia e caracterização sucessional em um remanescente de Caatinga em Sergipe. **Gaia Scientia**, Paraíba – BR, v. 10, n. 4, 30 set. 2016.

SIMONETTI, D. S.; ULABY, F. T. (eds.). **Manual of Remote Sensing**. 2 ed. v. 1. Falls Church VA: American Society of Photogrammetry, 1983.

SLATER, P. N. Remote sensing: optics and optical systems. **Reading, Mass., Addison-Wesley Publishing**, v. 1, 1980.

SOCHER, L. G.; RODERJAN, C. V.; GALVÃO, Franklin. Biomassa aérea de uma floresta ombrófila mista aluvial no município de Araucária (PR). **Floresta**, Brasil, v. 38, n. 2, 2008.

- STOVALL, A. E. *et al.* Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR. **Remote sensing of environment**, [S.I], v. 200, p. 31-42, 2017.
- TORRES, R. *et al.* GMES Sentinel-1 mission. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 120, p. 9-24, 2012.
- TUCKER, C. J. Red and Photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v.8, p. 127–150, 1979.
- VASCONCELOS, A. O. **Modelagem da biomassa do manguezal da apa de guapi-mirim utilizando dados multitemporais polarimétricos do sensor**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.
- VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. 1997.
- VERRELST, J. *et al.* Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation biogeophysical properties—a review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.I], v. 108, p. 273-290, 2015.
- VIRGENS, A. P. *et al.* Biomassa de espécies florestais em área de caatinga arbórea. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Brasil, v. 37, n. 92, p. 555-561, 2017.
- VOIVONTAS, D.; ASSIMACOPOULOS, D.; KOUKIOS, E. G. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. **Biomass and bioenergy**, [S.I], v. 20, n. 2, p. 101-112, 2001.
- WANG, L. *et al.* Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data. **The Crop Journal**, [S.I], v. 4, n. 3, p. 212-219, 2016.
- WU, C. *et al.* Comparison of machine-learning methods for above-ground biomass estimation based on Landsat imagery. **Journal of Applied Remote Sensing**, [S.I], v. 10, n. 3, p. 035010, 2016.
- YUE, J. *et al.* Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. **Remote Sensing**, [S.I], v. 9, n. 7, p. 708, 2017.
- ZANDLER, H.; BRENNING, A.; SAMIMI, C. Quantifying dwarf shrub biomass in an arid environment: comparing empirical methods in a high dimensional setting. **Remote Sensing of Environment**, [S.I], v. 158, p. 140-155, 2015.
- ZHANG, B. *et al.* Application of synthetic NDVI time series blended from Landsat and MODIS data for grassland biomass estimation. **Remote Sensing**, [S.I], v. 8, n. 1, p. 10, 2016.
- ZHAO, P. *et al.* Forest aboveground biomass estimation in Zhejiang Province using the integration of Landsat TM and ALOS PALSAR data. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, [S.I], v. 53, p. 1-15, 2016.

ZHAO, F. *et al.* Remote sensing estimates of grassland aboveground biomass based on MODIS net primary productivity (NPP): A case study in the Xilingol grassland of Northern China. **Remote sensing**, [S.I], v. 6, n. 6, p. 5368-5386, 2014.

ZHU, X.; LIU, D. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.I], v. 102, p. 222-231, 2015.