

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Karlla Karem da Silva

**AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA DA
CAATINGA DO SEMIÁRIDO PARAÍBANO**

Campina Grande, Maio de 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA DA CAATINGA NO
SEMIÁRIDO PARAÍBANO**

KARLLA KAREM DA SILVA

Campina Grande-PB

MARÇO, 2019

KARLLA KAREM DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA DA CAATINGA DO
SEMIÁRIDO PARAÍBANO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escala

Sub-área: Radiação e Sensoriamento remoto

Orientador: Profa. Dra. Célia Campos Braga

Campina Grande-PB

MARÇO, 2019

S586a

Silva, Karlla Karem da.

Avaliação da produtividade primária bruta da caatinga do semiárido paraibano / Karlla Karem da Silva. – Campina Grande, 2019.

64 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Profa. Dra. Célia Campos Braga".

Referências.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Dióxido de Carbono. 3. Produtividade Primária Bruta (PPB). 4. Meteorologia de Meso e Grande Escala.

I. Braga, Célia Campos. II. Título.

CDU 528.8(043)

KARLLA KAREM DA SILVA

AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA DA CAATINGA DO
SEMIÁRIDO PARAIBANO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/03/2019

BANCA EXAMINADORA


Profa. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Profa. Dra. VALÉRIA PEIXOTO BORGES
Departamento de Solos e Engenharia Rural
Centro de Ciências Agrárias
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pela graça de ter me proporcionado vencer mais uma etapa de minha vida profissional, possibilitando a realização desse mestrado, me dando sabedoria e força para vencer os obstáculos árduos do caminho. A minha família, por ter me apoiado, em especial a minha mãe Regina Lúcia da Silva. Ao meu namorado Thiago de Lima Gonçalves pela paciência e encorajamento nos momentos mais difíceis.

Um agradecimento especial a minha orientadora Profa. Dra. Célia Campos Braga, a qual sinto um grande carinho e admiração, por seus ensinamentos, por sua orientação e principalmente por ter aceitado esse desafio junto comigo, sempre solícita e buscando me ajudar o máximo possível. Ao Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva por seu auxílio e contribuição.

Agradeço ainda, as minhas amigas Adriana de Souza Costa e Wanessa Luana de Brito Costa pela ajuda e companheirismo diário na pós-graduação. A Sílvia Maria Dantas, Mayara Monique Almeida Moura Nunes, Jéssica Gomes Fontes, Eliton Sancler Gomes Sales.

Meus agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos do mestrado. Ainda, a torre micrometeorológica do INSA graças ao projeto N°: 446172/2015-4, financiado pelo CNPq na pessoa do Prof. Dr. Carlos A.C. dos Santos e aos dados da torre micrometeorológica do CDSA/UFCG na pessoa do Professor Dr. Hugo Morais de Alcântara.

RESUMO

A vegetação é uma das grandes responsáveis pela fixação do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, que se dá pelo processo de fotossíntese. Esse gás em excesso na atmosfera pode causar um superaquecimento da mesma, conseqüentemente um desequilíbrio climático no globo. Uma das variáveis utilizadas para quantificar o carbono, que um ecossistema absorve é a Produtividade Primária Bruta (PPB), a qual pode ser estimada através de sensoriamento remoto e/ou por meio de torres micrometeorológicas, utilizando o método Eddy Covariance. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi quantificar e analisar a captura de CO_2 absorvido pela vegetação caatinga, para duas microrregiões do semiárido paraibano, utilizando dados de sensoriamento remoto do sensor MODIS/Terra e de torre micrometeorológica instalada em áreas de caatinga conservada a saber: Área 1 Agreste paraibano na vizinhança de Campina Grande, e Área 2 em Sumé, no Cariri paraibano no período de 2013 a 2017. Para isso, calculou-se a PPB pelo método de Monteith (1972), o qual utiliza como variáveis determinantes a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação e a eficiência de uso da luz. Em seguida, fez-se a validação dos dados estimados com os medidos na torre micrometeorológica para a Área 1, localizada no Instituto Nacional do Semiárido (INSA) e com o produto MOD17A2H na Área 2. Os resultados obtidos apresentaram maior correlação entre PPB e IVDN estimados na Área 1. Observou-se ainda, que o parâmetro que mais influenciou na PPB foi a precipitação, pois no período estudado a caatinga teve maior emissão do que captação de carbono, possivelmente ocasionado pela baixa precipitação e altas temperaturas. Embora, com pouca condição para fotossintetizar, a caatinga apresentou absorção do CO_2 , evidenciando assim, sua importância para o controle dos gases de efeito estufa.

Palavras-chave: PPB; Dióxido de Carbono; Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The vegetation is one of the great responsible for the fixation of the atmospheric carbon dioxide (CO₂), which is given by the process of photosynthesis. This excess gas in the atmosphere can cause an overheating of the same, consequently a climatic imbalance in the globe. One of the variables used to quantify the carbon that an ecosystem absorbs is Gross Primary Production (PPB), which can be estimated through remote sensing and / or through micrometeorological towers using the Eddy Covariance method. In this context, the objective of this study was to quantify and analyze the capture of CO₂ absorbed by the caatinga vegetation to two microregions of the Paraíba semi-arid region, using remote sensing data from the MODIS/Terra sensor and a micrometeorological tower installed in areas of conserved caatinga: Area 1 Agreste in the vicinity of Campina Grande, and Area 2 in Sumé, in Cariri, Paraíba, from 2013 to 2017. PPB was calculated by the Monteith method (1972), which uses as determinant variables the photosynthetically active radiation absorbed by the vegetation and the efficiency of light use. Then, the data were validated with those measured in the micrometeorological tower for Area 1, located in the National Institute of the Semi-Arid (INSA) and with the product MOD17A2H in Area 2. The results obtained showed a higher correlation between PPB and IVDN estimated in Area 1. It was also observed that the parameter that most influenced the PPB was precipitation, because in the period studied the caatinga had a higher emission than carbon capture, possibly caused by low precipitation and high temperatures. Although, with little condition to photosynthesize, the caatinga presented CO₂ absorption, evidencing its importance for the control of greenhouse gases.

Keywords: PPB; Carbon Dioxide; Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do bioma Caatinga. Fonte: (SANTOS, 2015).	18
Figura 2 - Localização do estado da Paraíba (Nordeste do Brasil), em destaque as áreas 1 Campina Grande e área 2 Sumé. Fonte: autora (utilizando shapefile da AESA).	34
Figura 3 - Variabilidade espacial dos totais médios anuais da precipitação na região de estudo no período de 1962 a 2017. Fonte: autora (utilizando dados/shapefile da AESA).	35
Figura 4 - Totais mensais para os anos de 2013 a 2017 e totais médios mensais de 24 anos de Campina Grande (AESAs, 2018).....	41
Figura 5 - Médias mensais de temperatura do ar para o período de 2013 a 2017 em Campina Grande. Fonte: (INSA, 2018).....	42
Figura 6 - Totais mensais para o período de 2013 a 2015 e média climatológica para a cidade de Sumé-PB. Fonte: AESA	43
Figura 7 - Médias mensais de temperatura do ar para o período de 2013 a 2015 em Sumé. Fonte: AESA.	44
Figura 8 - Diagrama de dispersão e curva de regressão entre (a) PPBmedido e PPBestimado, entre (b) PPBmedido e PPB_MOD17A2H, (c) PPBestimado e PPB_MOD17A2H para Área 2.	48
Figura 9 - PPB diário (gC/m ² /dia) para o período de 2013 à 2017 na Área 1, nos dias de máxima e mínima precipitação de cada ano. (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84). 50	
Figura 10 - PPB diário (gC/m ² /dia) para o período de 2013 à 2015 na Área 2 nos dias de máxima e mínima precipitação (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).....	51
Figura 11 - Relação da PPB com a precipitação para o período de estudo na Área 1(a) e Área 2(b).....	53
Figura 12 - (a) Variabilidade temporal da PPB e IVDN e (b) Diagrama de dispersão e curva de regressão da PPB (gC/m ² /dia) x IVDN para o período de 2013 a 2017 na Área 1.	55
Figura 13 – (a) Variabilidade temporal do PPB e IVDN e (b) Diagrama de dispersão e curva regressão entre PPB (gC/m ² /dia) x IVDN para o período de 2013 a 2015 na Área 2.	56
Figura 14 - (a) Variabilidade temporal do PPBmedido e IVDN e (b) Diagrama de dispersão e curva regressão entre PPBmedido (gC/m ² /dia) x IVDN para o período de 2013 a 2017 na Área 1.....	57

Figura 15 - Valor total diário da PPL (Produtividade Primária Líquida) e Re (Respiração) para o período de 2013 à 2017 na área 1..... 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Determinação dos produtos do sensor MODIS/Terra utilizados.....	36
Tabela 2-Dados diários da PPB ($\text{gC}/\text{m}^2\text{dia}$) para caatinga na área 1 estimado pela metodologia sugerida ($\text{PPB}_{\text{estimado}}$), MOD17A2H, torre micrometeorológica ($\text{PPB}_{\text{medido}}$).	46
Tabela 3-Dados diários da PPB ($\text{gC}/\text{m}^2\text{dia}$) para caatinga na área 2 estimado pela metodologia sugerida ($\text{PPB}_{\text{estimado}}$), MOD17A2H.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer

DN – Número digital

DOA – Dia de ordem do ano

EC – Eddy Covariance

EMA – Erro médio absoluto

EMP – Erro absoluto percentual

ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus

EOS - Earth Observing System

GEE – Gases de efeito estufa

HDF (*Hierarchical Data Format*)

IMG – Imagine

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IVDN – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

LANSAT – Land Remote Sensing Satellite

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MISR - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

OLI - Operational Land Imager

PPB – Produtividade Primária Bruta

PPL – Produtividade Primária Líquida

REQM - Raiz do erro quadrático médio

REM - Radiação eletromagnética

RFA - Radiação fotossinteticamente ativa

RFAA - Radiação fotossinteticamente ativa absorvida

TIRS - Thermal InfraRed Sensor

TM - Thematic Mapper

UR – Umidade relativa

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2 – Dióxido de carbono

CH_4 – Metano

O_3 - Ozônio

CFC_s - Clorofluorcarbonos

N_2O - Óxido nitroso

O_2 – Oxigênio

α – Albedo

T_s – Temperatura da superfície

T_a – Temperatura do ar

T_{opt} - Temperatura média do ar do mês de máximo IVDN

T_{dia} - Temperatura média diária do ar

$R_{\rho 1}$ - Reflectância da banda correspondente ao infravermelho próximo

$R_{\rho 2}$ - Reflectância da banda correspondente ao vermelho

ϵ - Eficiência do uso da luz

ϵ' - Eficiência máxima de uso da luz

Λ – Fração evaporativa

s_i - Variáveis simuladas

o_i - Variáveis observadas

n - Número de observações

x – variáveis observadas

y – variáveis simuladas

r – Correlação linear de Person

r^2 – Coeficiente de determinação

Gt - Gigatoneladas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Semiárido e Bioma Caatinga	17
3.2. Ciclo do Carbono (CO ₂).....	20
3.3. Fotossíntese.....	23
3.4. Ações antrópicas na emissão do CO ₂	25
3.5. Sensoriamento Remoto aplicado à estimativa da concentração do carbono....	27
3.6. Produtividade Primária Bruta e Índice de vegetação	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1. Área de estudo	33
4.2. Dados	35
4.3. Metodologia	37
4.4. Estimativas dos Índices de Vegetação	39
4.5. Estimativa da PPB pelo método Eddy Covariance	39
4.6. Análise estatística	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1. Climatologia da Região	41
5.1.1 Campina Grande.....	41
5.1.2 Sumé.....	42
5.2. Produtividade Primária Bruta (PPB) na caatinga	44
5.3. Precipitação x PPB.....	52
5.4. IVDN x PPB	53
5.5. Produtividade Primária Líquida (PPL)	58
6. CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE.	66

1. INTRODUÇÃO

A Paraíba abrange uma área de 56.468,4 km² com 223 municípios e população aproximada de 3.766.528 habitantes, último censo (IBGE, 2018). O estado é subdividido em seis microrregiões climatológicas, a saber: Litoral, Agreste, Brejo, Cariri/Curimataú, Sertão e Alto-Sertão, sendo grande parte compreendida pelo Bioma Caatinga. Segundo Souza et al. (2015), o estado da Paraíba é o que tem melhor representação da caatinga, devido as características edafoclimáticas presentes nessa região, que favorecem a formação desse tipo de vegetação.

A Caatinga tem importância relevante para a manutenção ecossistêmica da região, tendo em vista que o bioma vem sendo continuamente modificado pelo antropismo e mesmo pelas condições naturais do tempo. Sua preservação é de suma importância para manutenção de outros biomas, já que o ciclo biológico é um sistema onde um componente auxilia na manutenção e existência dos demais. Este bioma apresenta características específicas com grande biodiversidade e alto endemismo, com elevada adaptação das plantas às características do semiárido, sendo considerado pelo Ministério do Meio Ambiente como um dos grandes biomas brasileiros, com 734.000 km² (ANDRADE-LIMA, 1981, 1989; SILVA, 2015).

Mesmo a caatinga demonstrando grande biodiversidade, ainda é uma das vegetações mais modificadas antropicamente no Brasil, apresentando 80% de sua vegetação alterada (SOUZA, 2015). Devido à forte antropização, grande parte do bioma apresenta alta degradação, sendo que, segundo os dados do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) o estado da Paraíba é o mais afetado pela degradação extrema, ou seja, “desertificação”, apresentando ainda a região do Cariri, 59,2% da vegetação degradada (CHAVES et al., 2015). A substituição da caatinga pela agropecuária é um dos métodos que mais causa degradação, além do extrativismo, reduzindo a cobertura vegetal e sua biodiversidade. Juntamente com as características climáticas das regiões a qual está inserida, a mesma pode ter um comprometimento em seu equilíbrio e processo regenerativo.

Aliado a riqueza em diversidade e recursos naturais do bioma caatinga, a necessidade de sua conservação foram os motivos para sua escolha, além da contribuição que este apresenta para a ciclagem dos gases atmosféricos. A mudança de folhas diversas vezes no ano, quando em condições climáticas favoráveis, como por

exemplo em anos de precipitação média a alta no Nordeste, favorece o processo de fotossíntese. Por sua vez absorve o gás carbônico da atmosfera, contribuindo no resgate de um dos Gases do Efeito Estufa (GEE).

A utilização das técnicas de sensoriamento remoto é extremamente viável no monitoramento e estimativa da captação de biomassa, por ser uma ferramenta que possibilita trabalhos de grande extensão e rapidez na determinação de suas variáveis. Por exemplo, a determinação da Produtividade Primária Bruta (PPB) como variável que determina a concentração de CO₂ captada pelas plantas é de suma importância, pois auxilia a compreensão do comportamento da vegetação e a contribuição desta às mudanças climáticas, já que este gás é termorregulador.

A capacidade e a importância da caatinga na fixação do carbono, como também por outros tipos de vegetação, ainda não é suficientemente estudada. Garbulsky et al. (2010) defendem que a fixação do carbono por parte de ecossistemas ainda não é bem compreendida, tornando-se necessário que sejam desenvolvidas mais pesquisas a cerca desse assunto, bem como os efeitos que as mudanças e danos causados pelo uso da terra podem interferir na fixação do carbono como também no clima local.

Considerando a grande liberação dos GEE na atmosfera atualmente, como também os danos que esse aumento pode acarretar às condições climáticas do planeta, e ainda a necessidade de demonstrar a importância que a caatinga exerce na ciclagem do ar e outros recursos, esse estudo tem por objetivo quantificar e analisar a PPB em duas microrregiões do semiárido paraibano utilizando técnicas de sensoriamento remoto e dados da torre micrometeorológica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Quantificar e analisar espacialmente e temporalmente a captura de dióxido de carbono (CO₂) absorvida pela vegetação caatinga através da Produtividade Primária Bruta em duas microrregiões do semiárido paraibano (Cariri e Agreste), a partir de dados de sensoriamento remoto e torre micrometeorológica.

2.2. Objetivos específicos

- Estimar e analisar a Produtividade Primária Bruta (PPB) pela vegetação de caatinga na região;
- Analisar o comportamento sazonal da PPB;
- Validar os dados obtidos do sensor MODIS/Terra com os medidos em estação micrometeorológica;
- Avaliar a influência do Índice de vegetação por diferença normalizada na PPB.
- Analisar os processos de absorção (PPL) e liberação (Re) de CO₂.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Semiárido e Bioma Caatinga

A Região Semiárida Brasileira, entre as latitudes aproximadas de 3° e 19°S, compreende uma área de 1.128.697 Km² ao longo dos estados do Nordeste, com exceção apenas do Espírito Santo (SUDENE, 2017). A mesma apresenta condições insuficientes para manter seus rios, que em sua maioria são intermitentes, nos períodos de ausência prolongada de precipitação. Uma das exceções é o rio São Francisco, o qual possui características hidrológicas que permitem a sua sustentação durante todo o ano. Essa delimitação geográfica foi definida com base em três critérios: I) Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 mm; II) Índice de aridez de até 0,5 calculado através do balanço hídrico; III) Risco de seca ou prolongamento da estação seca, de um ano para outro, superior a 60% tomando-se por base o período entre 1970 e 1990 (INSA, 2013).

O Semiárido apresenta um clima totalmente terminante nas características dos outros elementos que compõem sua paisagem, com vegetação adaptada ao período seco ou chuvoso e relevo com solos em sua maioria pouco desenvolvidos. Com temperaturas altas, variando entre 26 a 28°C de médias anuais. Essa região demonstra deficiência em seu balanço hídrico devido ao potencial evaporativo ser maior do que a precipitação, forçando as plantas a desenvolverem um sistema de adaptação ao longo dos anos, onde estas entram em um estágio de latência, ou também conhecido como “dormência”, esperando o momento energético propício para florir e se desenvolver (ARAÚJO, 2011). Devido a alta evapotranspiração e reduzida umidade do solo, o balanço hídrico anual é negativo (CORREIA et al., 2011). Predomina ainda, uma massa de ar seca e quente que intensifica a evaporação dos solos, rios e vegetação (ARAÚJO, 2011). Além disso, há ainda o fenômeno El Niño ocasionando secas periódicas durante 4 a 6 anos (ARAÚJO, 1996).

A Caatinga cobre originalmente mais de 800.000 km² (Figura 1), estendendo-se pela totalidade do estado do Ceará (100%) e mais de metade da Bahia (54%), da Paraíba (92%), de Pernambuco (83%), do Piauí (63%) e do Rio Grande do Norte (95%), quase metade de Alagoas (48%) e Sergipe (49%), além de pequenas porções de Minas Gerais (2%) e do Maranhão (1%). De acordo com Sampaio (2010) a mesma apresenta muitas variações ambientais, desde a disponibilidade hídrica com casos de solo raso até

ambientes com lagoas de água permanente, como também a disponibilidade de nutrientes variando de solos férteis até solos rasos e pouco férteis. Toda essa variação da condição do ambiente propicia a caatinga uma diversidade em suas características.

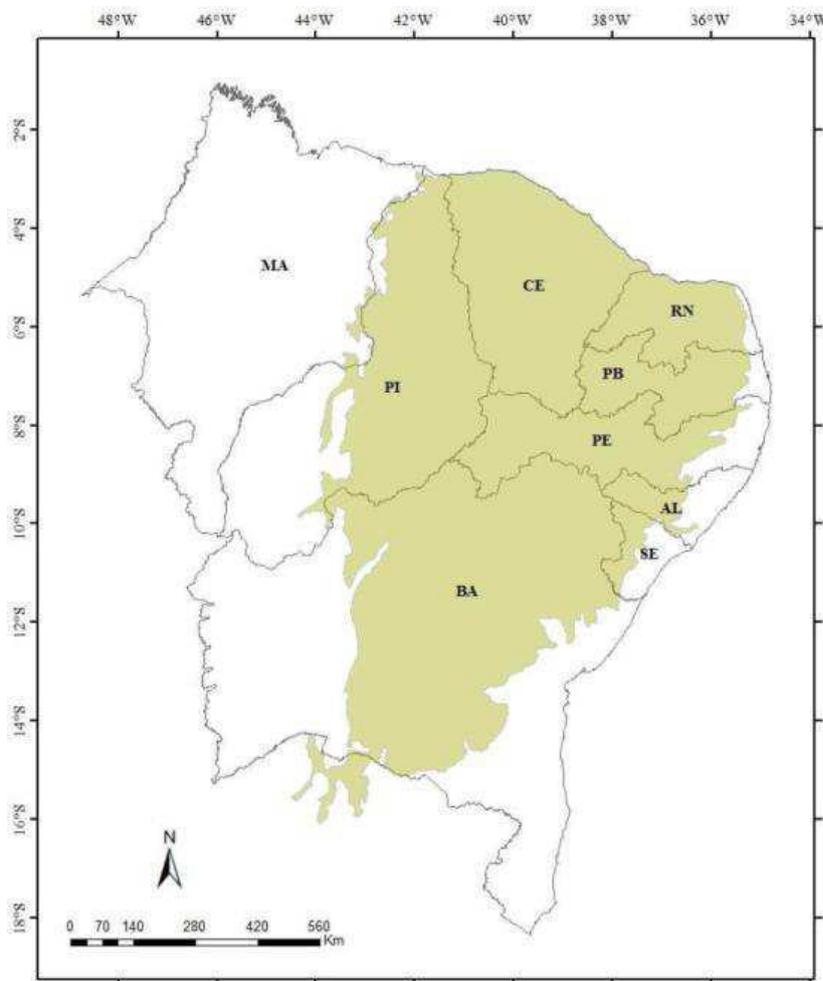


Figura 1 - Representação do bioma Caatinga. Fonte: (SANTOS, 2015).

Compreendida dentro da região de clima semiárido, esta vegetação apresenta comportamento de grande adaptabilidade, uma destas é sua característica caducifólia, devido a pouca distribuição hídrica na maior parte do tempo, favorecendo assim sua resistência a grandes períodos de estiagem. Vegetação com bastante densidade lenhosa e grande biodiversidade, onde muitas das espécies apresentam em sua estrutura, acúleos e folhas pequenas, que agem como protetoras contra a desidratação pelo calor e vento.

Apresenta grande interação com a atmosfera e com o solo, recobrendo o último e o protegendo dos intensos raios solares no período de estiagem, ao caírem como uma camada de folhas fenadas. Ao cair da temperatura à noite, as folhas absorvem umidade

do ar (INSA, 2013). Difere entre áreas relativamente abertas com plantas apresentando porte arbustivo e áreas mais densas com vegetação de porte arbóreo. Além das condições fisiográficas da região, outro fator determinante que define a característica dessas áreas é antropização. Apenas mais ou menos 40% da área é composta por vegetação nativa e grande parte desta é usada com a finalidade de extração de lenha. Poucos são os ambientes conservados dentro deste bioma, ocorrendo alguns casos devido a sua inacessibilidade. É um dos biomas mais degradados do país.

Os meios de maior degradação do ecossistema da caatinga podem ser distribuídos em três grandes categorias. A primeira baseada no distúrbio causado pelo crescimento econômico a partir da criação de estradas, reservatórios e extensão agrícola, devastando grandes áreas de vegetação. A segunda ocorreu através da exploração lenta, más contínuas a partir do corte e queima para a agricultura e produção agropecuária. E a terceira, a partir da introdução de espécies animais e vegetais invasoras, como garantia para abastecimento da população rural, substituindo o uso de espécies nativas (SILVA et al., 2017).

Devido ao aumento gradativo da devastação da caatinga, pesquisas de conservação são cada vez mais necessárias, contribuindo ainda no diagnóstico dos índices de desertificação, que segundo Santos (2015) é um processo de degradação ambiental que ocorre em áreas áridas, semiáridas e sub-úmidas secas. Silva et al.(2017) relatam que mesmo a população tendo hoje mais conhecimento sobre a biodiversidade e importância que a caatinga tem, os mesmos ainda não reduziram representativamente sua interferência. Mesmo as gestões públicas tendo consciência do grau de desertificação ocasionado pela degradação da floresta, a mesma não é protegida, nem em seus ambientes de conservação, que hoje são incapazes de assegurar a biodiversidade da região.

De acordo com Santos (2015) no Brasil a área susceptível a desertificação que é composta por caatinga equivale a 62%. Sendo que na Paraíba dos 223 municípios, 208 são considerados susceptíveis a esse estágio de degradação, estando incluída nessa área a região do Cariri Paraibano (BRASIL, 2004). Torna-se emergencial a necessidade de proteção e conservação do bioma Caatinga, devido a sua grande importância para o equilíbrio ecossistêmico brasileiro, o que já se foi provado em diversas pesquisas e devido a sua grande devastação. Em contrapartida, está a importância da região

paraibana na composição deste bioma, sendo um dos estados que melhor representaria a flora de caatinga, já que grande parte de seu território é dominado pelo clima semiárido (ARAÚJO et al., 2005).

O estado da Paraíba é subdividido geomorfologicamente a partir os climáticos mais significativos do estado que são: úmido, subúmido e semiárido. Seu clima apresenta altas temperaturas, variando entre 22°C a 30°C com média de 26°C totalmente influenciada pelo relevo e precipitação variando de 400 a 800 mm anuais. Os meses mais frios em quase todo o estado variam de junho a agosto e os mais quentes de outubro a dezembro. A distribuição de chuvas é bastante variável ao longo de todo o ano, sendo que no setor central do estado, onde está localizada a região do Cariri a precipitação média anual varia em torno de 300 a 500 mm, já na região do Agreste varia de 700 a 1200 mm. Insolação mínima de 6 horas diárias, classificação climática “As” e regime de chuva em abril a julho para a região do Agreste e o mínimo de 7 horas, clima Bsh e regime de chuva ocorrendo entre fevereiro a maio nos Cariris (FRANCISCO E SANTOS, 2018). Dentro das regiões climáticas, as espécies de caatinga variam suas características entre o Agreste (zona de transição) ao Sertão.

Os principais sistemas meteorológicos causadores de alterações nas condições de tempo na Paraíba são os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, Ondas de Leste e a ZCIT, sendo que esta última é uma grande determinadora da intensidade das chuvas no norte e nordeste. (LIMEIRA, 2008). A variação da precipitação e topografia resulta no balanço hídrico negativo em grande parte dos meses, o que é típico de regiões Semiáridas. Chuvas torrenciais são uma das causas da erosão de solos, pois estas removem a proteção permanente fornecida pelo sistema radicular da vegetação (FIGUEIREDO et al., 2012).

3.2. Ciclo do carbono

O carbono é dos elementos essenciais à vida na Terra fazendo parte da composição dos carboidratos, lipídios, proteínas e DNA, além de outros compostos. Este é reciclado pelo ar, pela água e pelos organismos vivos. Compõe 0,038% do volume da troposfera e apresenta grande quantidade da composição da água. Os responsáveis pelo consumo e transporte desse, nos ecossistemas terrestre e aquático são

os produtores (ex. vegetação), após sua remoção através da fotossíntese, os mesmos o convertem em carboidratos complexos (ex. $C_6H_{12}O_6$) (TAIZ E ZEIGER, 2013).

A circulação do carbono na biosfera ocorre através da captação do oxigênio dos produtores quando consomem os consumidores e decompositores, realizando a respiração aeróbica. Essa respiração permite a quebra da glicose e outros compostos orgânicos que por sua vez iram converter o carbono em CO_2 e liberá-lo no ecossistema atmosférico, ou aquático (MILLER, 2008). Ou seja, os mecanismos de respiração e fotossíntese proporcionam o ciclo do carbono na biosfera.

Parte do carbono encontra-se no ambiente aquático sob a forma de carbonato dissolvido, ou estocado em sedimentos marinhos ou ainda em forma orgânica particulada nas águas dos mares. Todo esse material é reciclado dentro da cadeia de plâncton e nécton (peixes) que realizam a respiração, o devolvendo a forma inorgânica. Grande parte do estoque de carbono planetário está aprisionado nas camadas sedimentares terrestres, através da morte e decomposição de plantas a milhões de anos, tornando-se combustíveis fósseis. Esse carbono fica impedido de retornar ao ciclo até que venha a ser extraído e queimado pela ação humana ou por meio de longos processos geológicos que o liberam para a atmosfera. Entretanto a queima desses combustíveis, o liberam de forma muito rápida no ar, o que o torna uma fonte esgotável e que pode causar um desequilíbrio em seu ciclo.

O ciclo do carbono é um mecanismo que funciona muito semelhante ao ciclo da água, utilizando a energia solar como fonte de força motriz, entretanto se torna mais complexo devido a todas as reações químicas que este tem que passar. As etapas para o carbono ciclar através de ecossistemas são: **Reações Assimilativas e Desassimilativas; Troca de CO_2 atmosfera/oceano e Precipitação de Sedimentos de Carbono nos Oceanos** (RICKLEFS, 2012). Para uma melhor compreensão dessas etapas, o mesmo autor as definiu como:

Reações Assimilativas e Desassimilativas

Reação de transformação de energia. Na fotossíntese, o carbono ganha elétrons e é reduzido, sendo que o período de ganho é acompanhado por um ganho de energia química, posteriormente uma relativa quantidade de energia é perdida através da respiração, perdendo assim elétrons de energia química.

Troca de CO₂ atmosfera/oceano

Troca física entre a atmosfera e os oceanos, lagos e águas correntes. O CO₂ é trocado constantemente entre o oceano e a atmosfera. O mesmo se dissolve imediatamente na água, tornando assim o oceano 50 vezes mais composto por CO₂ do que a atmosfera. Do total de CO₂ na atmosfera 35 Gt são assimilados pelas plantas terrestres e 84 Gt pelos oceanos e águas superficiais, por ano.

Precipitação de Sedimentos de Carbono nos Oceanos

Processo ocorrente apenas nos sistemas aquáticos, envolvendo dissolução e precipitação de carbono. Ambas as situações se equilibram. A dissolução e deposição do carbono nas águas oceânicas ocorrem 100 vezes mais lentamente quando comparado a desassimilação do mesmo nos sistemas biológicos. A maior parte do carbono da terra está presa em rochas sedimentares.

A formação do estoque terrestre é subdividida principalmente entre rochas, carbonato, carvão mineral e petróleo, entre outros, e grande parte está estocada nas florestas, sendo que esta última contribui tanto para o armazenamento, através da fotossíntese, como também como parte integrante do ciclo biológico (fotossíntese - decomposição) tornando-se um ecossistema de grande importância para o equilíbrio do estoque de carbono. As plantas e os solos apresentam uma eficiência de armazenamento do carbono maior do que o existente na atmosfera (SILVA, 2013).

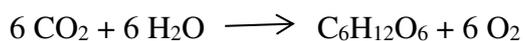
O sistema solo-planta é o grande responsável pela absorção e estocagem do CO₂, sendo de grande importância para o balanceamento e equilíbrio deste elemento para a atmosfera. As plantas tanto fixam como emitem gás, ocorrendo a emissão através da morte e decomposição de florestas mortas ou a combustão desse material. Ao ocorrer a fixação do CO₂, a floresta está tendo a função de “sumidouro” e quando está ocorrendo a emissão a mesma age como “fonte”. Essas funções demonstram a importância das florestas vivas, quando se deseja uma maior absorção do que emissão de CO₂ para a atmosfera (SILVA, 2013). No período noturno o movimento do CO₂ na planta é ascendente (para cima) devido ao processo de respiração, entretanto no período diurno o fluxo no interior do dossel se torna descendente (para baixo) removendo o gás do ar (TOWNSEND et al., 2006).

Através do mecanismo de fotossíntese é gerada uma molécula de O₂ equivalente a quantidade de CO₂ absorvida, ou seja, a cada molécula de CO₂ absorvida é lançada uma molécula de O₂, em uma condição considerada normal. Devido ao fato de todos os animais oxidarem através de obtenção de energia, formam-se assim CO₂ e H₂O, proporcionando o processo de fotossíntese novamente. Assim pode-se dizer que o CO₂ liberado através da respiração dos seres vivos é equivalente a quantidade fixada através da fotossíntese. Entretanto, desde a expansão da indústria, a quantidade de CO₂ liberada é superior à assimilada (SANTOS, 1999).

O ciclo do carbono é muito influenciado e alterado pela atividade antrópica, como a queima de florestas e matéria orgânica. As regiões de grande área florestal (principalmente na faixa tropical) são geradores de muitas dessas atividades emissoras de carbono. Existe ainda uma grande quantidade de carbono alocada na parte rochosa de calcário na crosta terrestre (MILLER, 2008; TAIZ E ZEIGER, 2013).

3.3.Fotossíntese

A Fotossíntese é um mecanismo que utiliza a luz solar na sintetização de carboidratos a partir da utilização da água (H₂O) e do Dióxido de Carbono (CO₂), para produção de energia, que quase todos os organismos vegetais realizam para suprir seu metabolismo. Os organismos fotossintetizantes realizam essa geração energética a partir da oxidação da água e redução do CO₂ atmosférico, liberando oxigênio (O₂) e matéria orgânica (TAIZ E ZEIGER, 2013).



A fotossíntese vegetal depende principalmente da presença de plantas, animais e bactérias. Outro fator relevante para a ocorrência desse mecanismo é o regime hídrico. A energia gerada nesse mecanismo, que pode ser na forma de glicose, é responsável pela manutenção da biomassa. Essa energia será dissipada através dos demais ecossistemas pela distribuição do nível trófico.

A luz é absorvida e distribuída nos vegetais através da pigmentação, sendo que parte da energia é absorvida e outra parte é refletida. O padrão de absorção é conhecido como espectro de absorção. Os cloroplastos são as organelas que apresentam essa pigmentação, mais precisamente nos tilacóides. As clorofilas, que é um dos tipos de tilacóides, determina a coloração verde dos vegetais, que vai influenciar diretamente na

absorção da luz. Essa pigmentação está presente em todos os eucariontes fotossintetizantes (GUERRA, 2010).

A luz solar que chega as plantas é medida em unidade de energia ou fótons. A irradiância que atinge a superfície foliar da planta se refere ao número de fótons ou ainda em termos de energia, que pode ser chamada de **radiação fotossinteticamente ativa (RFA)**. Essa irradiância vai variar de acordo com o dia e com a parte da vegetação atingida, se no topo de uma vegetação densa ou na parte inferior. De 1,3 KW/m² de energia radiante do sol que alcança a Terra, menos de 5% é convertida em carboidratos pela fotossíntese, a metade da luz incidente tem um comprimento de onda curto ou longo, impossibilitando sua absorção pelos pigmentos fotossintetizantes. 15% da PAR absorvida ainda é transmitida ou refletida através da folha. Dos 85% absorvidos, parte é perdida em forma de calor e outra parte como fluorescência, assim menos de 5% da energia incidente é convertida em energia armazenada nos carboidratos (TAIZ E ZEIGER, 2013).

Segundo Taiz e Zeiger (2013) diversos fatores interferem na capacidade fotossintética das plantas, como por exemplo, o suprimento inadequado de luz, a disponibilidade de CO₂, sejam estes em excesso ou em demasia. Embora as plantas possuam níveis de controle da fotossíntese, existem limites de aclimação de luminosidade, temperatura e estresse hídrico que podem comprometer esse metabolismo. De acordo com a classificação da planta quanto a fotossíntese (planta C₃, C₄, CAM), sua temperatura ótima para realização desse metabolismo vai variar, já que a temperatura afeta todas as reações bioquímicas e a integridade da membrana nos cloroplastos.

A temperatura quando adequada para a fotossintetização da vegetação, é conhecida como **temperatura ótima**. Quando a mesma se encontra em ambiente com temperatura muito acima ou abaixo da ótima, as taxas fotossintéticas decrescem. Isso se dá tanto pelo aumento da respiração, como principalmente pela instabilidade causada no transporte de elétrons ligados a membranas (TAIZ E ZEIGER, 2013; KLUGE, 2015).

Plantas com metabolismo C₄, que são aquelas que sintetizam primeiramente o ácido oxalacetato, que é um carboidrato com quatro carbonos, através da fixação do CO₂ e, as plantas CAM (Metabolismo Ácido das Crassuláceas) tendem a ter uma temperatura ótima fotossintetizante mais elevada do que as plantas C₃, que são

conhecidas por ter o ciclo fotossintético através da formação do ácido fosfoglicérico em açúcar com três carbonos (SENAR, 2014). Assim, plantas C₄ e CAM apresentam um sistema adaptativo à assimilação do CO₂ em condições tropicais de baixa disponibilidade hídrica e altas temperaturas, disponibilizando condições de menor perda de água na fotossintetização e menor perda energética.

As mudanças nas faixas fotossintéticas de acordo com a temperatura é um fator importante no sistema adaptativo das plantas.

Plantas C₄ são aquelas encontradas em ambientes secos e quentes, que apresentam ciclo de fixação de CO₂ de Calvin-Benson, produzindo compostos orgânicos com quatro carbonos. Devido a isto, são mais eficientes na fixação do carbono, em ambientes com condições extremas de temperatura alta e escassez hídrica, pois fixam o CO₂ sem perder carbono para a fotorrespiração. Kluge (2015) relata que nessas plantas são encontradas a PEPcase (fosfoenolpiruvato carboxilase) uma enzima de maior afinidade pelo CO₂.

As plantas do tipo CAM são em sua grande maioria cactáceas, suculentas que apresentam sistema fotossintético ativo durante a noite, quando abrem seus estômatos, o contrário das demais plantas que abrem os estômatos durante o dia. Esse tipo de sistema adaptativo possibilita que estas percam pouca água na assimilação do CO₂ e a recuperação do CO₂ respirado nos ambientes áridos. Segundo Taiz e Zeiger (2013) o metabolismo CAM apresenta características de grande absorção de biomassa em ambientes áridos, com precipitações inadequadas e altas taxas de evaporação. Com cutículas espessas, grandes vacúolos e estômatos com aberturas pequenas, minimizando a perda de água.

A caatinga é uma vegetação com sistema fotossintético adaptado a condições adversas, entretanto o excesso de CO₂ na atmosfera em volumes tão altos, como também de outros GEE, gases responsáveis pela regulação térmica do planeta, estão favorecendo o aumento da temperatura, desfavorecendo a realização da fotossíntese, mesmo por essa vegetação adaptada.

3.4. Ações antrópicas na emissão do CO₂

O dióxido de carbono é um componente de grande importância na composição do ar atmosférico. É inofensivo em taxas consideradas normais e desempenha o papel de

“vidro de estufa”, recebendo assim o nome de “Gás de efeito estufa”, juntamente com o metano (CH_4), ozônio (O_3), os clorofluorcarbonos (CFC_s) e o óxido nitroso (N_2O), os principais gases do efeito estufa (RAMIRES, 2014). Esses gases, juntamente com o vapor de água, desempenham papel relevante ainda para o equilíbrio térmico de nosso planeta. O CO_2 é um gás incolor, com maior massa quando comparado ao ar (densidade 1,53 comparado ao ar), pouco solúvel em água, com boa estabilidade térmica e química (SANTOS, 1999).

A medida que é removido muito CO_2 da atmosfera, ela esfria, já quando gerado em excesso, a atmosfera esquenta. Essa influência térmica pode afetar o clima do planeta, quando ocorrida alterações em seu ciclo. Miller (2008) relata que aumento exponencial do CO_2 na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global, pode acarretar em danos a produção de alimento mundial, como também a destruição de habitats de espécies selvagens e acarretar na elevação dos níveis de água devido ao aumento da temperatura.

A concentração de carbono no planeta está distribuída em diversos tipos de sistemas naturais. Essa concentração quando comparada a presente na atmosfera, chega a ser bem mais superior. Existe uma relação direta entre todo o fluxo de carbono no planeta, desde aquele concentrado na atmosfera até a parcela existente na superfície terrestre. Segundo Taiz e Zeiger (2013) a concentração desse componente na atmosfera é 390 ppm, o dobro do que prevalecia nos últimos 420.000 anos, aumentando 1 a 3 ppm por ano, ocasionado principalmente pela queima de combustíveis fósseis.

A agricultura é a principal atividade utilizada pelo ser humano que emite GEE, mesmo esta contribuindo na parcela de absorção. Entretanto, de acordo com o manejo aplicado, a emissão será maior do que a absorção, seguida do desmatamento e a produção industrial (consumidora de combustíveis fósseis). Além destas, tem-se os incêndios florestais, expansão de fronteiras agropastoris e a elevação da temperatura global (contribuindo para os incêndios), chegando a agricultura ao equivalente a 60% das emissões no Brasil, nos colocando entre os 10 maiores emissores de GEE (IMAFLOA, 2015). Mesmo sendo alto o valor de absorção deste gás pela vegetação, esse valor reduz drasticamente quando esta é substituída por pastagem, devido à redução de biomassa (TOWNSEND et al., 2006).

Segundo Silva (2013) a estimativa para captação de carbono pelas florestas em uma escala global é de aproximadamente 12 a 15% que é emitido por combustíveis

fósseis, no período de 50 anos. Esse dado se tornaria válido caso fosse reduzido o desmatamento e fosse estabelecida em 700 milhões de hectares novas práticas florestais. Nessa perspectiva, as regiões tropicais liderariam a captação do carbono, com 80% através de reflorestamento abrangendo (16,4 GtC), sistemas florestais (6,3 GtC), regeneração florestal (20 GtC) e ações contra o desmatamento (16 GtC).

Santos (2015) em trabalho realizado para área de Caatinga, encontrou valores máximos de 15,4 gC/m²dia (média de 8,6 gC/m²dia) para área de recuperação e de 14,1 gC/m²dia (média 4,8 gC/m²dia) para área degradada no ano de 2013 no Agreste paraibano, o que demonstra que a caatinga apresenta uma captação de CO₂ significativa. A mesma constatou que a precipitação é fator influenciador na captação do carbono ao longo do ano de estudo.

3.5. Sensoriamento Remoto aplicado à estimativa da concentração do carbono

O Sensoriamento Remoto é utilizado em diversas linhas de pesquisa e atuação, umas das grandes áreas que tem se utilizado desta é a de conservação da natureza. Devido a sua versatilidade e capacidade de proporcionar um maior monitoramento das áreas, este método tem sido um grande aliado no acompanhamento do processo de degradação de muitos biomas, como também, devido a sua precisão na estimativa de projeção e cálculo de dados. Este também proporciona condições para estimar a importância que os biomas apresentam de acordo com algumas características específicas que apresentam.

Ao longo das décadas a vegetação do mundo vem sendo devastada, ocasionada tanto por atividades naturais como também (mais frequentemente) por intervenção antrópica. Essas mudanças acarretam em um desequilíbrio ambiental altíssimo, um desses desequilíbrios é emissão de GEE e a redução da absorção destes pela vegetação. Segundo Grilo (2011) o Brasil é um dos países que segundo o Plano Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC) emite gases de diversas maneiras, entre elas estão a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra (em particular para finalidade agrícola). Uma das regiões que sofre no uso do solo e devido as condições climáticas é o Nordeste, em particular o Semiárido. Nessa região, a vegetação caatinga apresenta um alto nível de estocagem de GEE.

O sensoriamento remoto auxilia na estimativa de absorção CO₂ pelos corpos existentes na superfície terrestre (vegetação, solo, etc.). A estimativa da concentração de CO₂ assim como de outros parâmetros tais como, índices de vegetação, entre outros, são de fundamental importância no monitoramento das mudanças ocorridas na cobertura vegetal, nos recursos naturais e, conseqüentemente no gerenciamento ambiental, já que estes são parâmetros essenciais para identificar processos de uso e ocupação de áreas, bem como indicativos de degradação ambiental (ROSENDO, 2005).

Um dos satélites que explora as características climáticas e as mudanças ocorridas na superfície terrestre é o MODIS/Terra. O MODIS exibe uma faixa de visualização de 2.330 km de largura, com uma frequência de passagens de 1-2 dias em 36 bandas espectrais discretas. Este mede a porcentagem de área da terra composta por nuvens, permitindo assim auxiliar na determinação de impactos causados por estas, juntamente com os aerossóis, no orçamento de energia da terra. Mede ainda as propriedades das nuvens, dos aerossóis, sendo estes por sua vez liberados por poluição humana, queima de biomassa e fontes naturais (tempestades de poeira, incêndios florestais, etc.) e ainda ajuda no entendimento da quantidade de vapor de água em uma coluna atmosférica (medida importante para a compreensão do sistema climático da terra) (TERRA, 2018).

Apresenta grande importância no monitoramento das mudanças climáticas em grande escala na biosfera levantando questionamentos sobre o funcionamento do ciclo do carbono global. Mede a atividade fotossintética de plantas (terrestre e marinha) com o intuito de estimar quanto GEE está sendo absorvido e usado na produtividade da planta, como ainda auxilia, juntamente com as medições de temperatura, no rastreamento de fontes e sumidouros de CO₂ (TERRA, 2018).

O sensor MODIS/Terra foi desenvolvido com o intuito de realizar o monitoramento frequente a longo tempo da superfície terrestre para um maior entendimento das mudanças globais. Esse sistema apresenta ampla cobertura espacial e espectral, continuidade nas tomadas de medidas e é o primeiro a apresentar o objetivo principal para pesquisas de mudanças globais. Com uma órbita de 705 km e cobertura espectral de $\pm 55^\circ$. Suas bandas são distribuídas da seguinte forma: da 1-7 apresentam aplicações terrestres; 8-16 observações oceânicas; 17-19 medições atmosféricas; 20-36 (exceto a 26) cobrem a porção termal (BARKER et al., 1992; LATORRE et al., 2003).

O estudo do vegetal a partir do sensoriamento remoto parte da interação da Radiação Eletromagnética (REM) com este, através de processos de absorção ocorridos por parte dos pigmentos fotossintetizantes das plantas, ocorrendo na região do visível (0,40 a 0,72 μm). Há necessidade de um nível de conhecimento para cada tipo de trabalho, de acordo com a variação e dimensão da variável de estudo (folha, planta, conjunto de plantas). Além deste, há ainda as diversas camadas que compõem as folhas, tecidos divididos em subcamadas, onde a face ventral, que é a parte que recebe maior intensidade da REM, está voltada para cima e é a estrutura que contém maiores estruturas de proteção. Existe ainda a epiderme, mais abaixo, o mesófilo paliçádico onde se encontra os pigmentos fotossintetizantes e mesófilos esponjosos (na face dorsal da folha) onde há maior lacuna entre as células que serão preenchidas por gases necessários para o processo de respiração e transpiração (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Todo o processo de interação da REM com a vegetação referente ao espectro óptico depende de fatores químicos e estruturais, proporcionando por sua vez o comportamento espectral da vegetação (SILVA, 2014). Segundo Ponzoni (2002) e Silva (2014), na vegetação o comportamento espectral é medido em três regiões do espectro eletromagnético:

- I) Região do visível (0,4 – 0,72 μm) – A energia eletromagnética é absorvida e espalhada através da estrutura foliar, sendo que a primeira ocorre seletivamente pela clorofila transmitindo-se posteriormente em através de calor ou fluorescência e ainda é convertida fotoquimicamente em energia armazenada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese. A maior parte da radiação é absorvida na região do azul através da pigmentação, a clorofila absorve na região do vermelho e na região do verde a maioria das plantas é transparente;
- II) Região do infravermelho próximo (0,72 – 1,1 μm) – A radiação e a água é absorvida em baixa quantidade, ocorre um considerável espalhamento interno nas folhas, a reflectância é relativamente constante, sendo que esta última pode vir a ocorrer devido aos fatores externos (disponibilidade de água) podem causar alterações na relação água-planta no mesófilo interferindo na reflectância, aumentando quando maiores

espaços na estrutura interna da folha ocorrer ocasionando maior espalhamento interno da radiação incidente;

- III) Região do infravermelho médio (1,1 – 2,5 μm) – nessa região a água absorve consideravelmente a radiação incidente, entre 1,3 a 2,0 μm e pontualmente entre 1,1, 1,45, 1,95, 2,7 μm , sendo eu a absorção advinda da água líquida afeta a reflectância das folhas.

Entretanto o comportamento espectral da vegetação se modifica de acordo com alguns fatores como o seu ciclo vegetativo, tipo de cultura, ângulo de visada, arquitetura do dossel e o tipo de substrato.

3.6. Produtividade Primária Bruta e Índice de vegetação

Um dos modelos empregados no cômputo da absorção do carbono pela vegetação é a Produtividade Primária Bruta (PPB). É uma modelagem que indica a quantidade de CO_2 retida pela vegetação após ter ocorrido o processo de conversão da forma inorgânica (quando na atmosfera) para a forma orgânica. Esse processo depende da luz, água e CO_2 (VELASQUE, 2013). Ou seja, é a fotossíntese bruta.

Grande parte dos métodos para estimação da PPB utiliza em sua metodologia o sensoriamento remoto, fundamentados na relação entre a eficiência de uso da luz e a radiação fotossinteticamente ativa (e absorvida) (SILVA et al., 2013). Parte da energia consumida pelas plantas é utilizada nos processos metabólicos de respiração e outra parte no acúmulo de biomassa. Machado (2014) em trabalho realizado em área de caatinga no Parque Nacional do Catimbau em Pernambuco, utilizando sensor Landsat 5, com amostras dos anos de 2001, 2003, 2007 e 2010, obteve a partir da metodologia de mensuração da PPB através da eficiência de uso da luz e radiação fotossinteticamente ativa, resultados significativos que demonstram a contribuição da caatinga na captura do carbono.

Um das técnicas mais utilizadas para medição do fluxo de CO_2 é o método de *Eddy Covariance* (EC), onde é calculada a assimilação dos fluxos de CO_2 e respiração da vegetação em uma escala espacial pequena em um espaço curto de tempo através de torres micrometeorológicas (RODRIGUES, 2018), medindo também a influência da precipitação e da temperatura na PPB e na respiração (RICKLEFS, 2010). Os fluxos medidos por este método representam as trocas líquidas com o ecossistema (PPL),

sendo que quando estes são representados em negativo, estão sendo absorvidos pelo ecossistema, já quando positivo está liberando para o ecossistema (CABRAL et al., 2013). Entretanto, mesmo apresentando grande confiabilidade no cálculo dos fluxos de CO₂, a técnica de EC se torna onerosa e nem sempre viável, devido a necessidade de instalação das torres e do alcance territorial ser reduzido, cobrindo poucos quilômetros. Devido a isto, o sensoriamento remoto se torna uma técnica de grande valia para este fim, pois possibilita o alcance de grandes extensões territoriais, sem a necessidade de instalação de qualquer equipamento em campo. Suas informações são coletadas através de sensores instalados a bordo dos satélites.

Segundo Rodrigues (2018) a partir da diferença entre a PPB e a respiração (Re), obtém-se a Produtividade Primária Líquida, que pode ser definida como a energia que as plantas acumulam através da biomassa, sendo a última uma das variáveis chaves no ciclo do carbono. O computo da PPB é realizado a partir da relação existente entre a eficiência de uso da luz (ϵ), a qual terá influência de acordo com o tipo de vegetação/bioma trabalhado e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (RFAA), sendo o último estimado a partir de índices de vegetação.

O IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é obtido através da razão entre diferença da reflectância das bandas do infravermelho próximo e o vermelho pela soma das bandas das mesmas. Este índice minimiza os efeitos topográficos quando produz uma escala linear de medida, reduz ruídos multiplicativos como iluminação e sombreamento de nuvens e, proporciona uma atenuação atmosférica (ROSENDO, 2005). Seus valores variam em uma escala entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior a densidade da cobertura vegetal valores negativos indicam ausência de cobertura vegetal (nuvens, água e neve). Solos descobertos e rochas refletem o vermelho e o infravermelho próximo quase na mesma intensidade, por conseguinte, seu IVDN aproxima-se de zero (ALLEN et al., 2002; RIZZI, 2004; EMBRAPA, 2014).

Assim, de posse dos índices de vegetação torna-se possível analisar os parâmetros biofísicos da vegetação. Estes são medidas radiométricas que podem demonstrar a influência que as condições meteorológicas podem causar sobre as plantas, como também a variação das características de crescimento (MOREIRA, 2018), ou seja, a partir destes pode-se monitorar o comportamento fenológico e os estádios da vegetação. Os índices de vegetação são ainda grandes indicadores da qualidade ambiental. O IVDN

é um índice utilizado no computo do PPB, além de ser um parâmetro indicativo de capacidade de fotossintetização da planta, que por sua vez exprime a capacidade de captação de biomassa pela mesma. Ainda, de acordo com Moreira (2018), o IVDN permite um levantamento das características temporal e sazonal do crescimento, senescência e coloração das folhas ajustando e determinando as características vegetais do bioma observado.

Felix (2013) obteve boa correlação entre o IVDN e o PPB em área de caatinga no semiárido pernambucano para os anos de 1985 e 2009, através do sensor TM (*Thematic Mapper - Mapeador Temático*) do Landsat 5, com um coeficiente de determinação de 85% da variação nos valores de PPB explicado pelo IVDN, demonstrando a relação direta existente entre este índice e a captação de carbono.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

As áreas de estudo estão localizadas no município de Campina Grande-Agreste, dentro do território do INSA (Instituto Nacional do Semiárido), ÁREA 1 (7°16'47.76" S, 35°58'29.21" W) e a segunda em Sumé-Cariri, dentro da área de conservação ambiental do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, campus da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), ÁREA 2 (7°39'38.8" S, 36°53'42.4" W) no estado da Paraíba (FIGURA 2), as mesmas são compostas por caatinga em processo de conservação.

Campina Grande está situada no Agreste, com uma altitude de 546 metros acima do nível do mar, com temperaturas mais moderadas, considerado tropical com estação seca. A umidade relativa máxima, mínima e média se situa em torno de 97,8%, 47,8% e 77%. Suas temperaturas máximas e mínima é da ordem de 28,8°C e 20,2°C respectivamente com média de 23,5°C segundo as normais climatológicas do INMET (INMET, 2018). Total médio anual da precipitação em torno de 797 mm (FIGURA 3) (AESAs, 2018). Região de transição entre a Zona da Mata e Sertão, possui uma população estimada de 407.472 habitantes (IBGE, 2018) e área de 593,026 km² (IBGE, 2017).

O Cariri localiza-se na franja ocidental do Planalto da Borborema, com índices pluviométricos baixos, clima regional (Bsh) com elevadas temperaturas, fracas amplitudes térmicas anuais e chuvas irregulares. Cortado pela bacia do rio Paraíba, apresenta uma paisagem predominante de caatinga hiperxerófila e baixa densidade demográfica. A temperatura média anual é de 26°C, com a mínima inferior a 20°C e umidade relativa do ar não ultrapassando 75% (BARBOSA, 2007).

A precipitação pluvial anual nessa microrregião varia entre 350 a 500 mm (FIGURA 3), ocorrendo entre os meses de março e abril influenciado pela ZCIT e de maio e junho pelas Ondas de Leste (LIMEIRA, 2008). A cidade de Sumé está localizada a uma altitude de 538 m a nível do mar, com população estimada em 16.864 habitantes (IBGE, 2018) e área equivalente a 838,07 km² (IBGE, 2017). Apresenta totais médios anuais em torno de 588 mm.

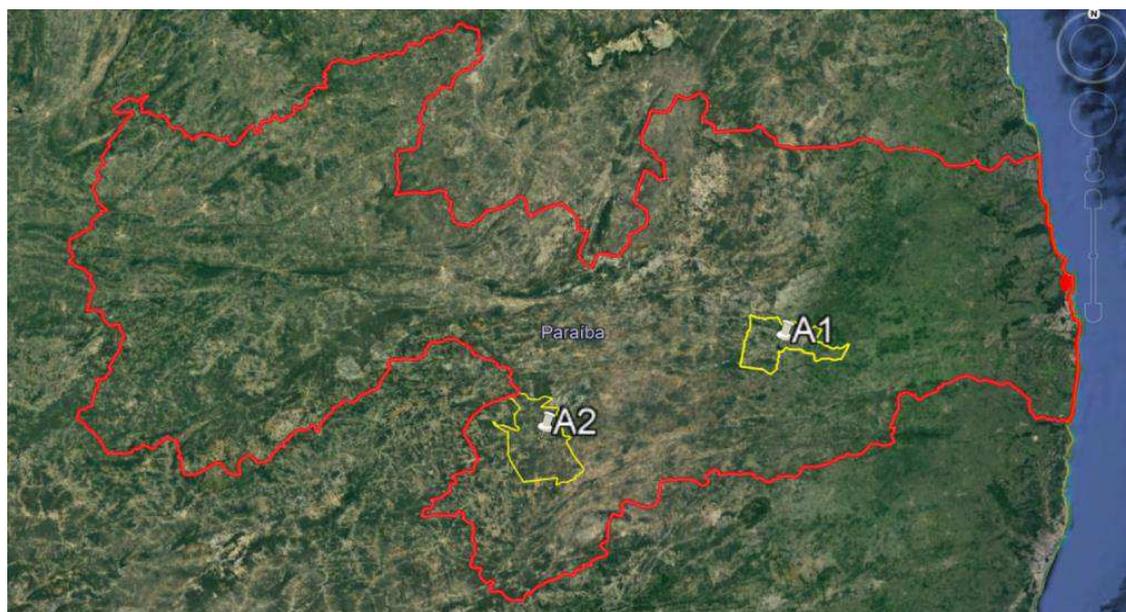
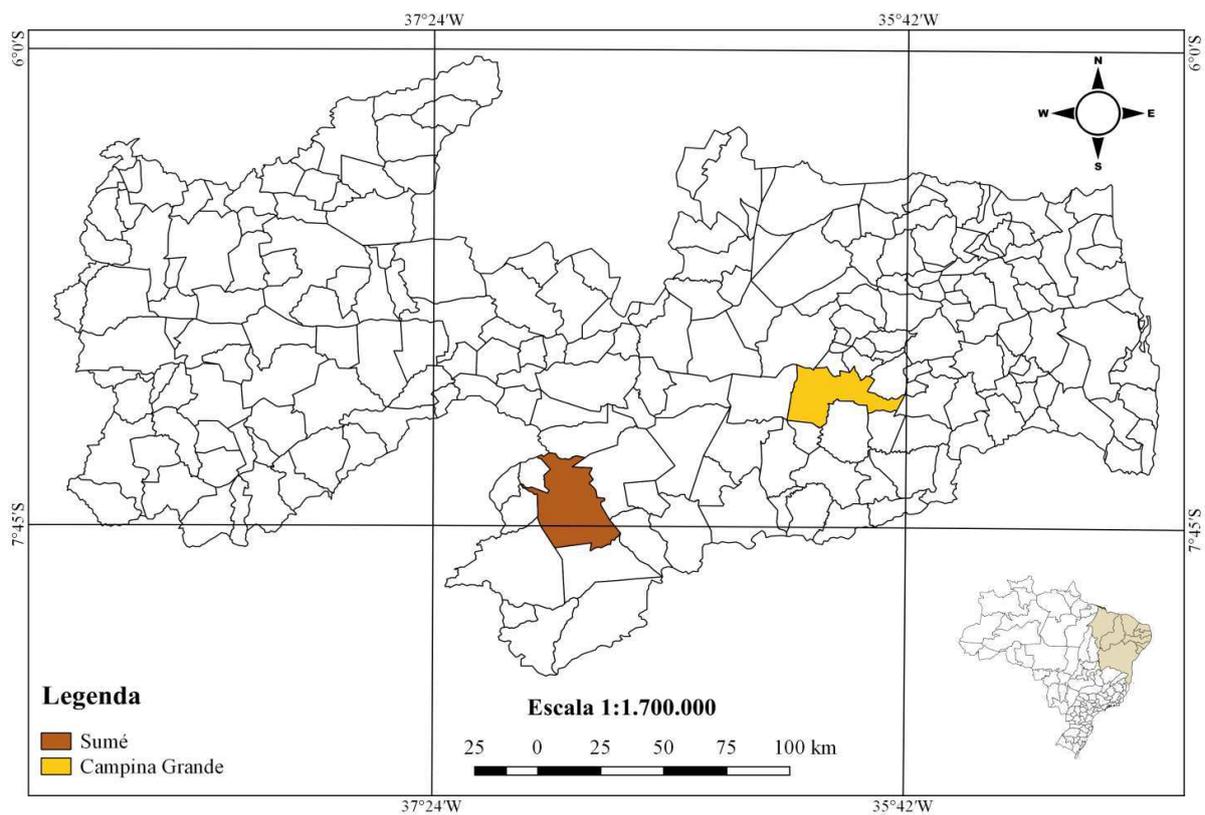


Figura 2 - Localização do estado da Paraíba (Nordeste do Brasil), em destaque as áreas 1 Campina Grande e área 2 Sumé. Fonte: autora (utilizando shapefile da AESA).

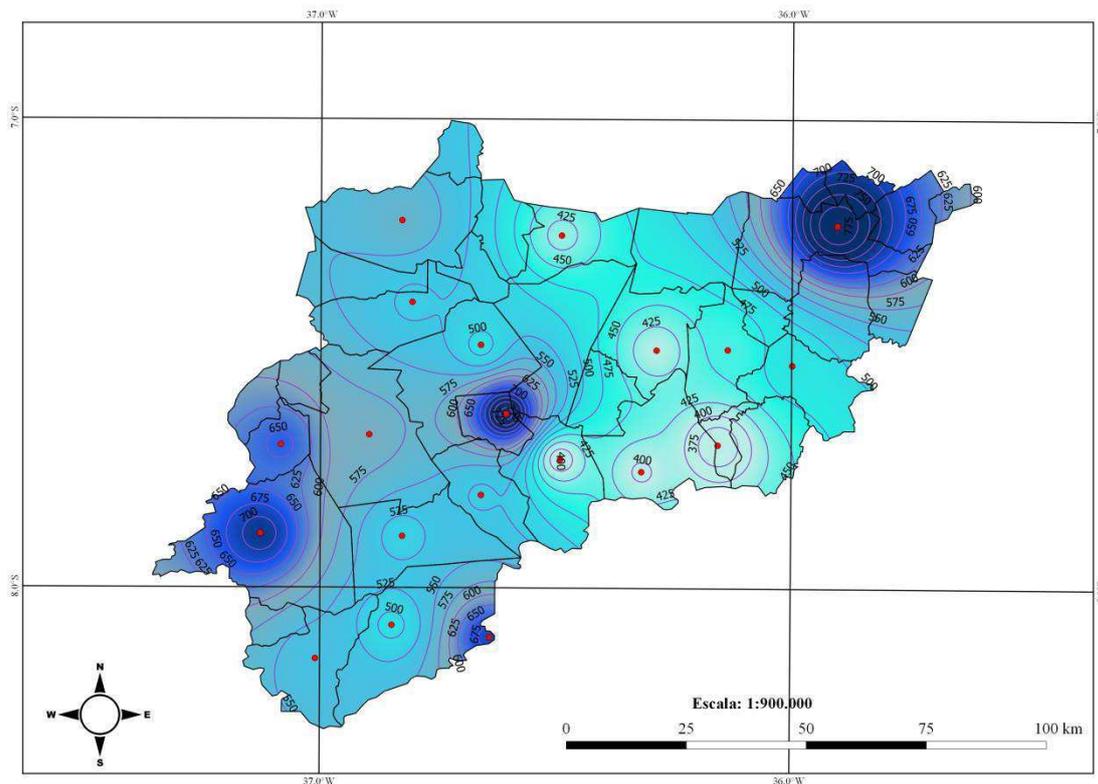


Figura 3 - Variabilidade espacial dos totais médios anuais da precipitação na região de estudo no período de 1962 a 2017. Fonte: autora (utilizando dados/shapefile da AESA).

4.2.Dados

A estimativa da PPB diária pelo método de Monteith (1972) na vegetação de caatinga foi realizada através da utilização do produto de reflectância e de temperatura da superfície do sensor MODIS/Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (TABELA 1). Utilizou-se, ainda, os dados de temperatura do ar e radiação de onda curta da estação micrometeorológica instalada no INSA (Instituto Nacional do Semiárido), região de Campina Grande-PB, no período de 2013 a 2017 e, na estação do CDSA/UFCEG (Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido) em Sumé-PB, para o período de 2013 a 2015. Para validação, foram utilizados os dados de fluxo de carbono da torre do INSA medidos pelo anemômetro sônico a cada 30 minutos, (posteriormente integrados para o período de 24h) através da técnica EC na ÁREA 1. Já na ÁREA 2 a validação foi realizada através dos dados da PPB (kgC/m^2) do produto MOD17A2H, gerado pelo MODIS/Terra que é um composto cumulativo de 8 dias (posteriormente dividido por 8, para obtenção do valor diário) baseado no conceito de eficiência de uso da luz, devido a indisponibilidade de torre micrometeorológica que

meça dados de fluxo. Calculou-se ainda o IVDN diário através do produto de reflectância MOD09GA.

Na determinação da temperatura da superfície utilizou-se o produto MOD11A1. Todos os produtos descritos são obtidos na plataforma REVERB/NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov/>).

Tabela 1- Determinação dos produtos do sensor MODIS/Terra utilizados.

PRODUTOS UTILIZADOS NO COMPUTO DA PPB				
Produto MODIS/Terra	Descrição	Resolução Temporal	Resolução espacial	Unidades
MOD09GA	Reflectância de superfície (bandas 1 a 7)	Diária	1 km e 500 m	Adimensional
MOD11A1	Temperatura da superfície terrestre e Emissividade	Diária	1 km	Kelvin [K]
MOD17A2H	PPB e Fotossíntese	8 dias	1 km	Kg C/m ²

Fonte: <https://modis.gsfc.nasa.gov>

Para a extração das informações com utilização das imagens de satélite foram realizados anteriormente alguns tratamentos nas mesmas, como:

- ✓ Importação – Conversão dos produtos que se encontram em formato HDF (*Hierarchical Data Format*) para o formato IMG (*Imagine*).
- ✓ Recorte – especifica qual área (tamanho) dentro da imagem vai ser trabalhada

Após os tratamentos, no produto de PPB foi realizada a correção da camada, multiplicando por 0,0001, dividindo por 8 para obtenção de dados médios diários e convertendo a unidade para gC/m²dia. No produto de reflectância foi aplicado o fator de

correção de 0,0001 e para o produto de temperatura foi multiplicado por 0,02 e convertida para °C quando necessário.

4.3. Metodologia

Para o cômputo da PPB foi utilizada a equação proposta por Monteith (1972):

$$\mathbf{PPB = RFAA \times \epsilon \text{ (gC m}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

RFAA: Radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (W m^{-2})

ϵ : Eficiência do uso da luz da vegetação (g C MJ^{-1})

A radiação fotossinteticamente ativa foi obtida através da equação de Bastiaanssen e Ali (2003):

$$\mathbf{RFA = 0,48 \times R_{s24h\downarrow} \text{ (W m}^{-2}\text{ dia}^{-1}\text{)}} \quad (2)$$

onde $R_{s24h\downarrow}$ a radiação solar de onde curta incidente no período de 24 horas.

No cômputo da fração da radiação RFA, que por sua vez é absorvida pela vegetação é expressa em função do IVDN, proposta por Daughtry et al. (1995):

$$\mathbf{RFAA = RFA \times (-0,161 + 1,257 \times \text{IVDN}) \text{ (Wm}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{)}} \quad (3)$$

Para determinação da eficiência do uso da luz utilizou-se a equação de Field et al. (1995), modificado por Bastiaanssen e Ali (2003):

$$\mathbf{\epsilon = \epsilon' \times T_1 \times T_2 \times \Lambda \text{ (gCm}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{)}} \quad (4)$$

ϵ' : eficiência máxima de uso da luz pela vegetação igual a $1,8 \text{ gCMJ}^{-1}$ segundo Ibrahim (2006),

T_1 e T_2 : contribuição da temperatura na eficiência de uso da luz pelas plantas

Λ : Fração evaporativa

A eficiência de uso da luz varia bastante de acordo com a disponibilidade de luz existente no ambiente.

As temperaturas utilizadas na equação anterior foram calculadas por:

$$T_1 = 0,8 + 0,02T_{opt} - 0,0005T_{opt}^2 \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2T_{opt} - 10 - T_{dia})} \times \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{dia})]} \quad (6)$$

T_{opt} : temperatura média do ar (°C) do mês de máximo IVDN

T_{dia} : temperatura média diária do ar (°C).

Para determinar os fluxos de calor sensível e latente utilizou-se a metodologia proposta por S-SEBI (ROERINK et al., 2000). Segundo o autor, a fração evaporativa para cada pixel da imagem de satélite pode ser extraída através da representação gráfica de todos os pixels da imagem através de coordenadas da temperatura da superfície (T_s) versus o albedo da superfície (α_s).

$$\Lambda = \frac{T_H - T_s}{T_H - T_{LE}} \quad (7)$$

A equação linear, que representa o limite máximo e mínimo:

$$T_H = a_H + b_H \alpha_s \quad (8)$$

$$T_{LE} = a_{LE} + b_{LE} \alpha_s \quad (9)$$

Substituindo T_H e T_{LE} , na equação 7, a fração evaporativa (Λ) pode ser reescrita por:

$$\Lambda = \frac{a_H + b_H \alpha_s - T_s}{a_H - a_{LE} + (b_H - b_{LE}) \alpha_s} \quad (10)$$

A estimativa do albedo à superfície, definido pela razão entre a radiação solar global refletida por cada pixel e a radiação solar incidente no mesmo, em todo o domínio da radiação de onda curta (0,3 a 3,0 μm), foi estimado pelo método de M. Tasumi et al. (2008) fundamenta-se na equação:

$$\alpha_{ST} = 0,215\rho_1 + 0,215\rho_2 + 0,242\rho_3 + 0,129\rho_4 + 0,101\rho_5 + 0,062\rho_6 + 0,036\rho_7 \quad (11)$$

Na equação, $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_7$ representam as reflectâncias da superfície relativas a cada uma das sete bandas espectrais do MODIS, distribuídas por meio do produto MOD09GA.

4.6. Estimativa do Índice de Vegetação

O IVDN é obtido pela razão entre a diferença das reflectâncias da região espectral do vermelho e do infravermelho próximo pela sua soma. As superfícies verdes têm um IVDN entre 0 e 1 e a água e a nuvem são geralmente menores que zero (ALLEN et al., 2002). Assim, o IVDN é dado pela equação:

$$\text{IVDN} = \frac{R_{\rho 2} - R_{\rho 1}}{R_{\rho 2} + R_{\rho 1}} \quad (12)$$

$R_{\rho 1}$: Reflectância da banda correspondente ao infravermelho próximo

$R_{\rho 2}$: Reflectância da banda correspondente ao vermelho

4.7. Estimativa da PPB pelo método Eddy Covariance

O método Eddy Covariance (EC) determina a PPB através da medição do fluxo de carbono entre o ecossistema e a atmosfera (NEE), adicionando a respiração deste ecossistema (Re).

$$\text{PPB} = \text{NEE} + \text{Re} \text{ (gC m}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{)} \quad (13)$$

A respiração é obtida a partir da soma dos valores noturnos de NEE, integrados a cada meia hora. Os valores são convertidos para a unidade gC m⁻²dia⁻¹.

4.8. Análise estatística

Para encontrar a relação existente entre as variáveis estimadas obtidas pelos produtos do sensor MODIS/Terra com os medidos na Torre micrometeorológica, foram utilizados os indicadores estatísticos do Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), dados pelas expressões abaixo (WILKS, 2006):

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x-y)^2}{n}} \quad (14)$$

$$\text{EMA} = \sum_{i=1}^n \frac{|x-y|}{n} \quad (15)$$

$$\mathbf{EPAM} = \frac{\sum_{i=1}^n |EP|}{n} \quad (16)$$

x: variáveis observadas

y: variáveis simuladas a partir da metodologia proposta

n: número de observações

Calculou-se ainda o coeficiente de *Correlação Linear de Person* (r) e seu *Coefficiente de Determinação* (R^2) (WILKS, 2006).

$$\mathbf{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x-\bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y-\bar{y})^2]}} \quad (17)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Climatologia da Região

5.1.1 Campina Grande

A cidade de Campina Grande, situada na mesorregião do Agreste, apresenta precipitação pluviométrica média anual de 797 mm no período 1994 a 2017 (AESA e EMBRAPA, 2018). A Figura 4 ilustra os totais mensais de precipitação dos 5 anos (2013, 2014, 2015, 2016 e 2017) estudados e totais médios mensais dos últimos 24 anos. Observa-se que os valores mensais dos anos estudados foram acima dos totais médios anuais, exceto 2017 que em quase todos os meses foram abaixo da média. Nota-se, ainda, que os meses de maiores precipitações ocorrem entre maio a julho em praticamente todos os anos, coincidindo com o período de inverno da região, com exceção apenas de 2016 que apresentou maior precipitação em janeiro. Os meses mais secos se verificam de outubro a dezembro.

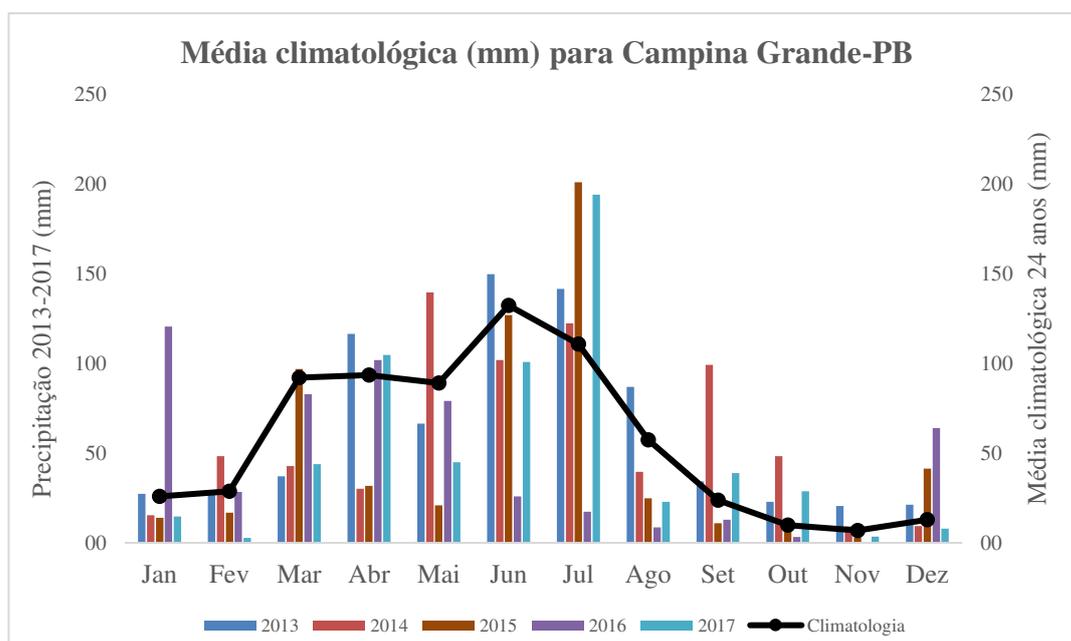


Figura 4 - Totais mensais para os anos de 2013 a 2017 e totais médios mensais de 24 anos de Campina Grande (AESA, 2018)

A Figura 5 ilustra a variabilidade média mensal das temperaturas do ar no período de 2013 a 2017. Observa-se que as mesmas oscilaram em torno de 21 a 25°C, com máximas no primeiro trimestre e mínimas em julho nos anos estudados.

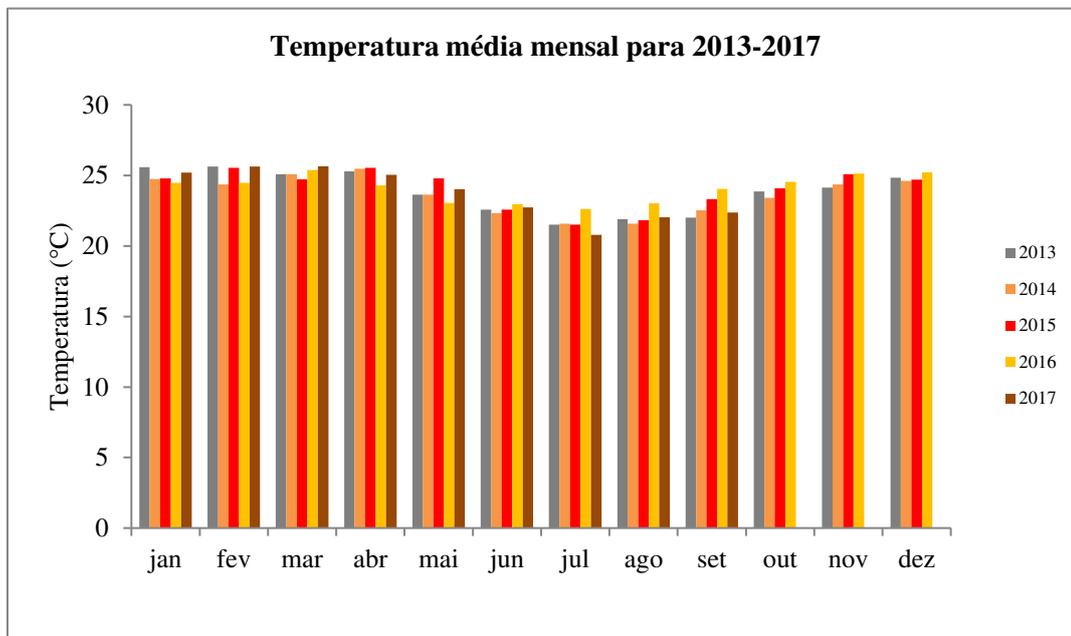


Figura 5 - Médias mensais de temperatura do ar para o período de 2013 a 2017 em Campina Grande. Fonte: (INSA, 2018).

5.1.2 Sumé

A cidade de Sumé apresenta totais médios da pluviometria no período de 24 anos de aproximadamente 514 mm, com máximos nos meses de março e abril e mínimo em setembro (FIGURA 6). Nos anos de 2013 e 2015, observa-se que os valores mensais estão abaixo dos totais médios anuais na maior parte do ano, exceto em 2014 em que os valores da precipitação estão acima na maioria dos meses. Neste ano de 2014, ocorreu chuva acima de 200 mm em março e abril.

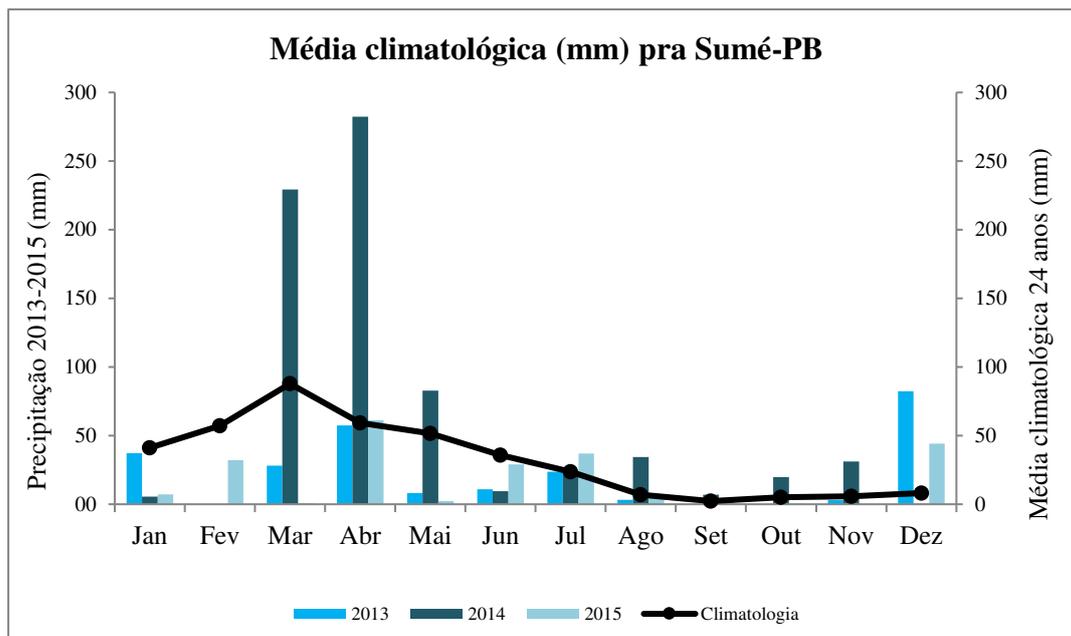


Figura 6 - Totais mensais para o período de 2013 a 2015 e média climatológica para a cidade de Sumé-PB. Fonte: AESA

A temperatura média é aproximadamente 25°C, com máxima da ordem de 27°C e mínima 22° C respectivamente nos anos estudados (FIGURA 7).

Com esses dados, podemos observar que o clima da região 1 e 2 (área 1 e área 2) são distintos, o que é comprovado pela distinção da microrregião. Com isto, as características edafoclimáticas da vegetação tendem a variar um pouco, mesmo estando compreendidas dentro do Semiárido Paraibano.

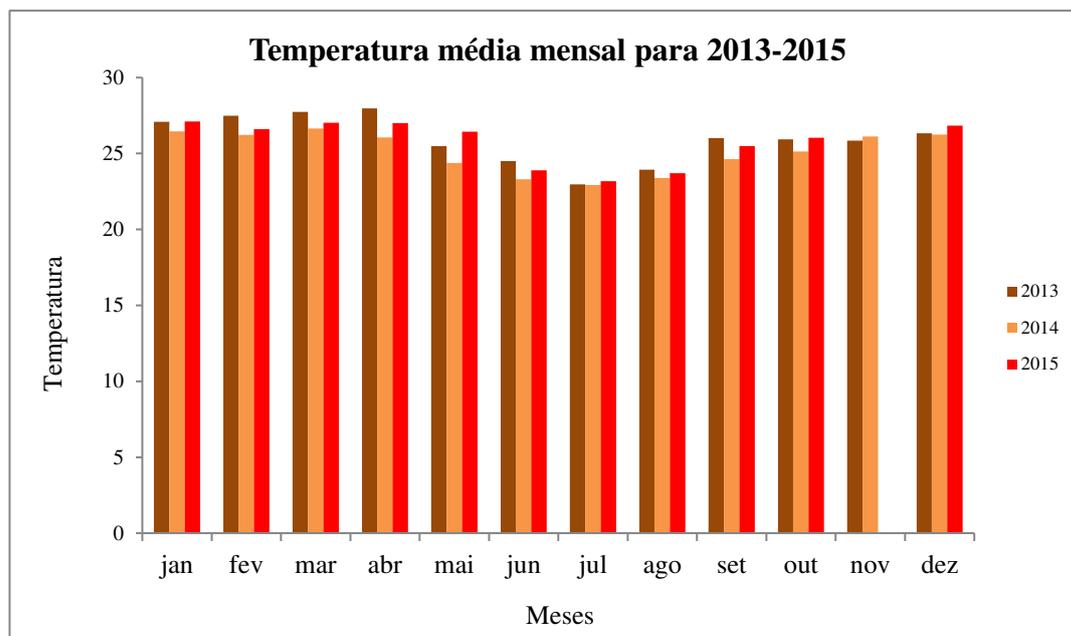


Figura 7 - Médias mensais de temperatura do ar para o período de 2013 a 2015 em Sumé. Fonte: AESA.

5.2. Produtividade Primária Bruta (PPB) na caatinga

A partir das imagens que tinham 70% da área sem cobertura de nuvens foram obtidas 39 imagens para a área 1 (Campina Grande) e 25 imagens para a área 2 (Sumé). Os valores da PPB medidos na torre micrometeorológica (PPB_{medido}), estimados com dados do MODIS ($PPB_{estimado}$) e com o produto MOD17A2H para as duas áreas estão dispostos na Tabela 2 e 3. A partir da metodologia empregada pode-se observar que a Área 1 apresentou uma PPB média de 8,61 ($gC/m^2/dia$), com valores máximos e mínimos de 23,58 e 2,63 gC/m^2 dia respectivamente. A análise anual mostra que no ano de 2013 a média de PPB foi 7,15 gC/m^2 , em 2014 de 10,47 gC/m^2 . A PPB em 2015 foi 6,93 gC/m^2 , em 2016 foi de 7,95 gC/m^2 e de 12,35 gC/m^2 para 2017, respectivamente. O ano de 2017 para Área 1 foi o que apresentou maior média. O erro médio absoluto e o percentual entre os valores medidos na torre micrometeorológica e estimados pelo MODIS/Terra foram 3,63 gC/m^2 e 31,6 respectivamente, o $REQM = 4,57 gC/m^2$ e entre os valores medidos na torre e o MOD17A2H foram 7,47 gC/m^2 e 62,15 respectivamente, $REQM = 8,58 gC/m^2$. O método de correlação entre os dados medidos e estimados foi $r = 0,79$ e entre os dados medidos e MOD17A2H foi $r = 0,66$ o que indica uma boa correlação entre as variáveis para o nível de significância $\alpha = 0,05$.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos da PPB para cidade de Sumé localizada no Cariri paraibano Área 2 para o período de 2013 a 2015. Os valores obtidos foram calculados a partir da metodologia proposta e valida com o produto MOD17A2H. Observa-se que a PPB média (PPB_{estimado}) é da ordem de 4,77 gC/m²dia, sendo que o ano que apresentou a maior média foi 2014 com 9,13 gC/m²dia. Nos anos de 2013 e 2015 as médias foram 1,57 e 2,13 gC/m²dia respectivamente. Os valores máximos e mínimos ocorreram em 2014 e 2013.

Os erros médio absoluto e percentual para localidade de Sumé foi de 2,47 gC/m²dia e 90,2 respectivamente e $REQM = 3,67$ gC/m²dia. A correlação linear entre os dados estimados, a partir da equação proposta por Monteith (1972) e os dados observados do MOD17A2H, foi $r = 0,87$ para o nível de significância de $\alpha = 0,05$. Esses resultados evidenciam que embora a amostragem tenha sido pequena, pode-se dizer que a metodologia proposta é consistente. A diferença entre os dados em ambas as áreas pode estar relacionada a distinção entre as metodologias, ressaltando que na Área 2 o MOD17A2H é uma estimativa com uma base de dados de 8 dias, o qual foi obtido a média. Isso ainda pode justificar a pouca variação nos dados do produto para as áreas, pois esta composição pode mascarar a influência da nebulosidade nos dados.

A variação distributiva acentuada da PPB em ambas as áreas ao longo do período de estudo pode estar relacionada às características fisiológicas da vegetação. A medida que esta se encontra em condições desfavoráveis, seja de temperatura ou disponibilidade hídrica, a mesma reduz sua função fotossintetizante economizando energia. Essa redução ocorre através da liberação de sua folhagem. Característica própria de muitas espécies vegetais de regiões tropicais, em particular de caatinga, por sua vez, responsável por sua capacidade adaptativa a condições extremas.

Essa condição extrema citada, foi encontrada no período da pesquisa, como pôde ser visto nos dados climáticos anteriormente citados, o que nos leva a acreditar que tenha sido o fator determinante para tais dados de PPB.

Tabela 2 - Dados diários da PPB (gC/m²dia) para caatinga na área 1 estimado pela metodologia sugerida (PPB_{estimado}), MOD17A2H, torre micrometeorológica (PPB_{medido}).

ÁREA 1									
DATA	DOA	PPBestimado gC/m ² dia	PPBmedido gC/m ² dia	EA gC/m ² dia	EP (%)	(MOD17A2H) gC/m ² dia	PPBmedido gC/m ² dia	EA gC/m ² dia	EP (%)
26/02/2013	57	3,18	7,3	4,12	56,43	2,6	7,3	4,7	64,38
15/04/2013	105	7,5	7,34	0,16	2,17	2,5	7,34	4,84	65,94
06/05/2013	126	8,14	17,27	9,13	52,86	6,6	17,27	10,67	61,78
22/05/2013	142	13,09	13,3	0,21	1,57	6,3	13,3	7,0	52,63
28/08/2013	240	9,69	13,77	4,08	29,62	5,5	13,77	8,27	60,06
22/10/2013	295	4,21	6,44	2,23	34,62	1,3	6,44	5,14	79,81
04/12/2013	338	4,23	8,15	3,92	48,09	2,4	8,15	5,75	70,55
03/03/2014	62	10,6	8,73	1,87	21,42	4	8,73	4,73	54,18
20/04/2014	110	6,85	8,12	1,27	15,64	2,4	8,12	5,72	70,44
20/05/2014	140	8,57	12,36	3,79	30,66	6,3	12,36	6,06	49,03
16/06/2014	167	15	19,24	4,24	22,03	8,7	19,24	10,54	54,8
02/07/2014	183	13,74	23,58	9,84	41,73	7,2	23,58	16,38	69,47
02/09/2014	245	10,23	11,71	1,48	12,63	1,7	11,71	10,01	85,5
25/09/2014	268	8,31	13,9	5,59	40,21	6	13,9	7,9	56,83
17/01/2015	17	2,9	4,42	1,52	34,38	2,9	4,42	1,52	34,4
27/01/2015	27	3,84	6,09	2,25	36,94	1,3	6,09	4,79	78,7
01/04/2015	91	6,68	6,88	0,2	2,90	3,2	6,88	3,68	53,5
21/04/2015	111	7,43	6,8	0,63	9,26	3,5	6,8	3,3	48,53
30/04/2015	120	9,79	4,76	5,03	105,67	3,2	4,76	1,56	32,8
05/05/2015	125	7,7	7,34	0,36	4,90	3,9	7,34	3,44	46,87
13/06/2015	164	9,4	7,68	1,72	22,39	8,5	7,68	0,82	10,68
28/09/2015	271	7,7	10,21	2,51	24,58	4	10,21	6,21	60,82
12/02/2016	43	23,58	25,02	1,44	5,75	3,9	25,02	21,12	84,41
17/06/2016	169	12,15	20,52	8,37	40,78	6,8	20,52	13,72	66,86
24/06/2016	176	10,18	15,46	5,28	34,15	6,3	15,46	9,16	59,3
29/06/2016	181	8,25	10,28	2,03	19,74	3,9	10,28	6,38	62,1
30/06/2016	182	8	10,2	2,2	21,56	4	10,2	6,2	60,9
26/07/2016	208	6,7	10,81	4,11	38,02	2,4	10,81	8,41	77,8
13/08/2016	226	6,73	8,28	1,55	18,71	1,6	8,28	6,68	80,7
19/09/2016	263	2,63	12,5	9,87	78,96	3,3	12,5	9,2	73,6
24/11/2016	329	5,9	8,29	2,39	28,82	2	8,29	6,29	75,87
01/12/2016	336	3,09	8,6	5,51	64,06	2,3	8,6	6,3	73,26
03/12/2016	338	3,73	7,55	3,82	50,59	2,3	7,55	5,25	69,54
08/12/2016	343	4,5	6,83	2,33	34,11	2,4	6,83	4,43	64,86
21/04/2017	111	9,23	12,3	3,07	24,95	2,6	12,3	9,7	78,86
12/05/2017	132	16,93	18,41	1,48	8,03	3,8	18,41	14,61	79,36
14/05/2017	134	8,68	14,47	5,79	40,01	9,5	14,47	4,97	34,4
05/08/2017	217	14,12	24,15	10,03	41,53	9,5	24,15	14,65	60,7
12/08/2017	224	12,81	19	6,19	32,57	7,6	19	11,4	60
MÉDIA		8,61	11,74	3,63	31,6	4,31	11,74	7,47	62,15
REQM			4,57				8,58		

Tabela 3 - Dados diários da PPB (gC/m²dia) para caatinga na área 2 estimado pela metodologia sugerida (PPB_{estimado}), MOD17A2H.

ÁREA 2					
DATA	DOA	PPBestimado gC/m ² dia	MOD17A2H gC/m ² dia	EA gC/m ² dia	EP (%)
26/02/2013	57	2,14	1	1,14	114
15/04/2013	105	1,83	2	0,17	8,5
06/05/2013	126	2,1	3	0,9	30
22/05/2013	142	1,5	2,1	0,6	28,57
28/08/2013	240	2,41	1,68	0,73	43,45
22/10/2013	295	0,43	1,4	0,97	69,29
04/12/2013	338	0,56	1,16	0,6	51,72
03/03/2014	62	4	0,8	3,2	400,00
20/04/2014	110	8,3	3,7	4,6	124,32
20/05/2014	140	18,5	6,17	12,33	199,84
16/06/2014	167	11,23	6,11	5,12	83,80
30/06/2014	181	11,14	5,6	5,54	98,93
02/07/2014	183	10,06	5,6	4,46	79,64
01/08/2014	213	6	4	2	50,00
19/08/2014	231	8,24	3,6	4,64	128,89
02/09/2014	245	7,75	2,55	5,2	203,92
25/09/2014	268	6,06	2,64	3,42	129,55
17/01/2015	17	1,71	1,8	0,09	5,00
27/01/2015	27	3,38	2,2	1,18	53,64
01/04/2015	91	2,76	2,5	0,26	10,40
21/04/2015	111	2,42	2,6	0,18	6,92
30/04/2015	120	1,82	1,9	0,08	4,21
05/05/2015	125	1,47	2,8	1,33	47,50
13/06/2015	164	2,9	0,9	2	222,22
28/09/2015	271	0,59	1,5	0,91	60,67
MÉDIA		4,77	2,77	2,47	90,2
REQM				3,67	

*DOA: dia de ordem do ano

*EA (erro absoluto); EP (erro percentual).

A relação funcional para a Área 1 (Campina Grande) entre PPB_{medido} x PPB_{estimado} foi igual a 0,79 ($R^2 = 0,63$), enquanto que para os dados de PPB_{medido} x MOD17A2H foi de 0,66 ($R^2 = 0,44$) para um nível de significância $\alpha=0,05$. Para a Área 2 (Sumé) a PPB_{estimado} x MOD17A2H foi de 0,87 ($R^2 = 0,75$) para o $\alpha=0,05$, conforme ilustrado na Figura 8a,b e c, respectivamente.

Os valores estatísticos da PPB encontrados neste estudo corroboram com os obtidos por Santos (2015) para área de caatinga em Campina Grande, no ano de 2013, utilizando o produto MODIS e medido na torre micrometeorológica. Foram menores aos valores encontrados por Rodrigues (2018) para o cerrado em São Paulo no ano de 2015 utilizando o Landsat 5 e MOD17A2H.

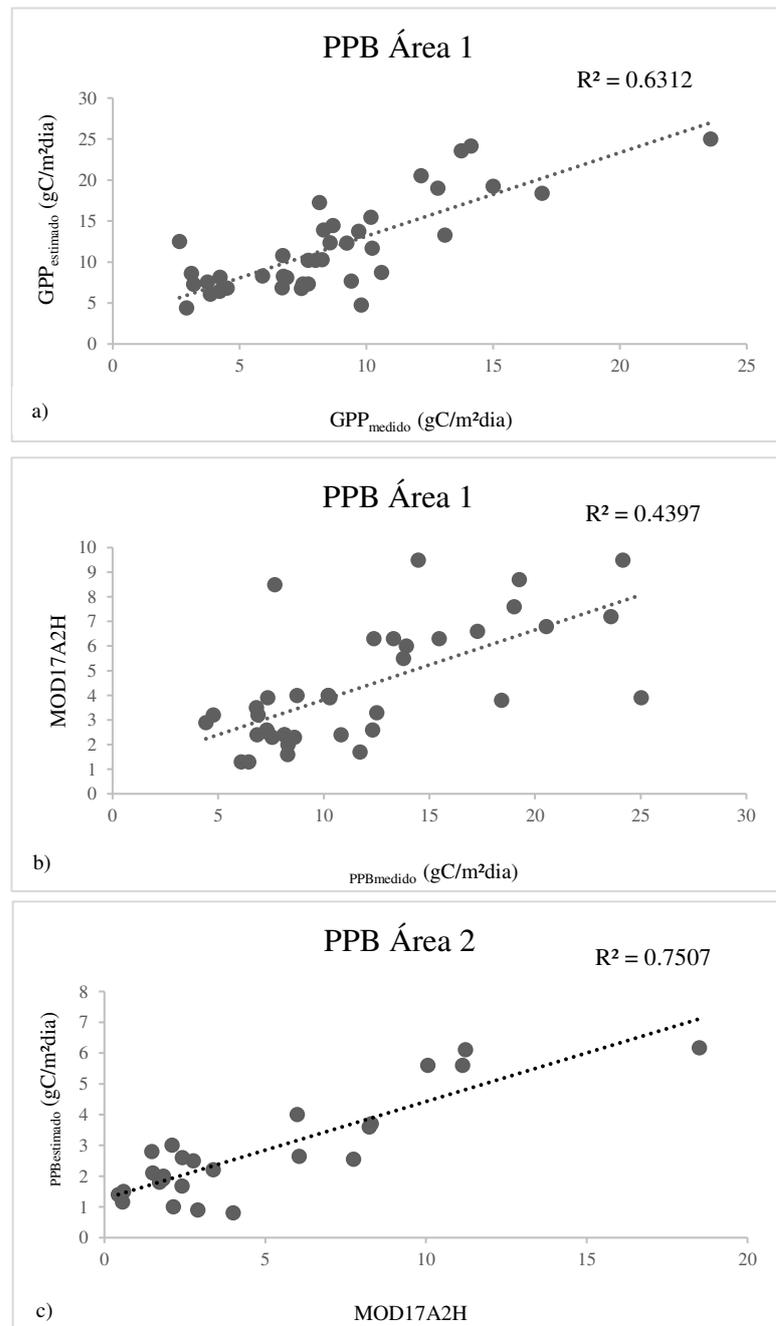


Figura 8 - Diagrama de dispersão e curva de regressão entre (a) PPB_{medido} e PPB_{estimado}, entre (b) PPB_{medido} e PPB_{MOD17A2H}, (c) PPB_{estimado} e PPB_{MOD17A2H} para Área 2.

Os mapas temáticos da variabilidade da $PPB_{estimada}$ podem ser visualizados na Figura 9 e 10. Observa-se que a diferença maior em média da captação foi de 3,9 $gC/m^2/dia$ na Área 1 (no leste da região) onde as características climáticas são mais favoráveis, mesmo durante o período mais seco, contribuindo para uma condição fotossintética pouco mais favorável.

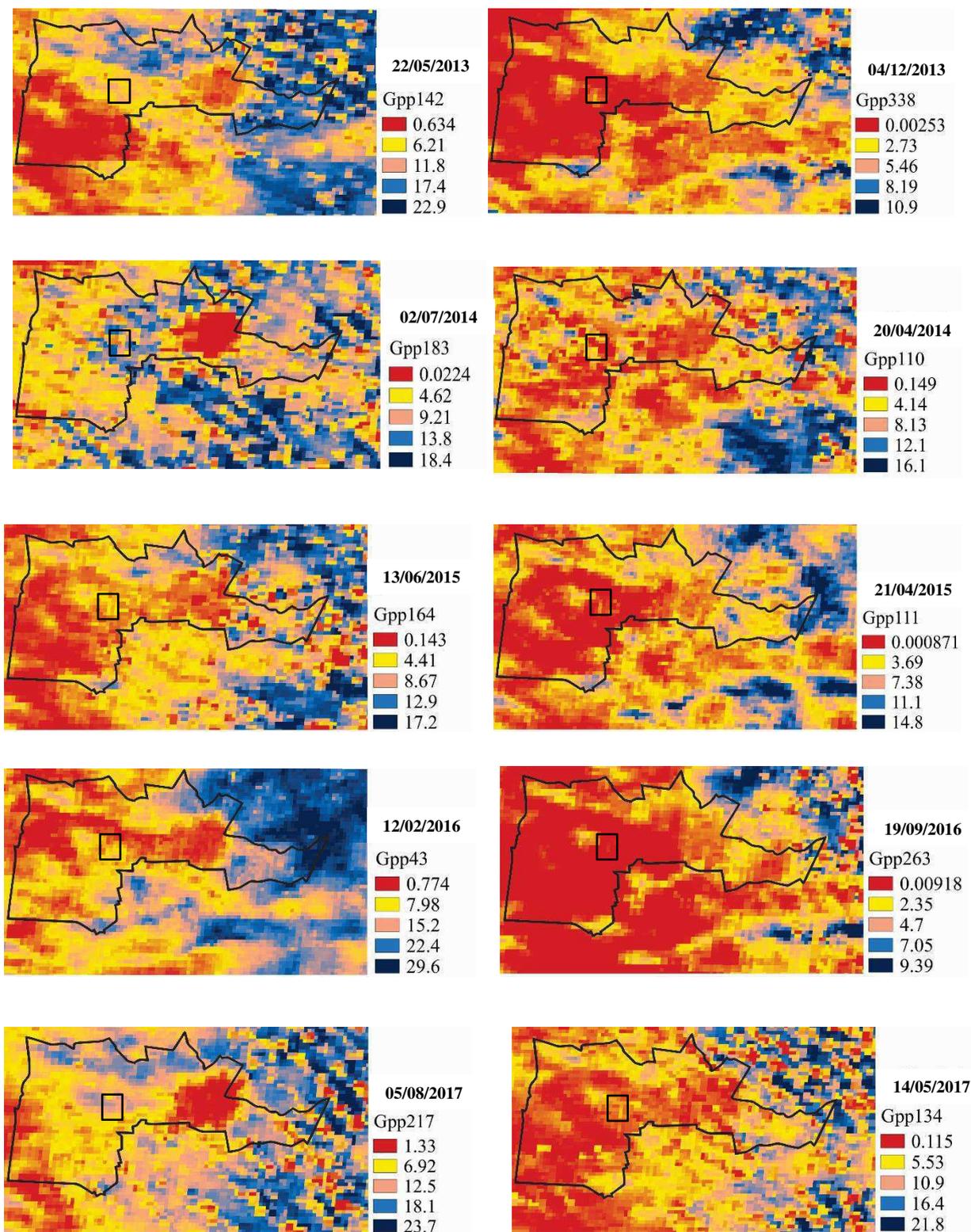


Figura 9 - PPB diário (gC/m²/dia) para o período de 2013 à 2017 na Área 1, nos dias de máxima e mínima precipitação de cada ano. (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

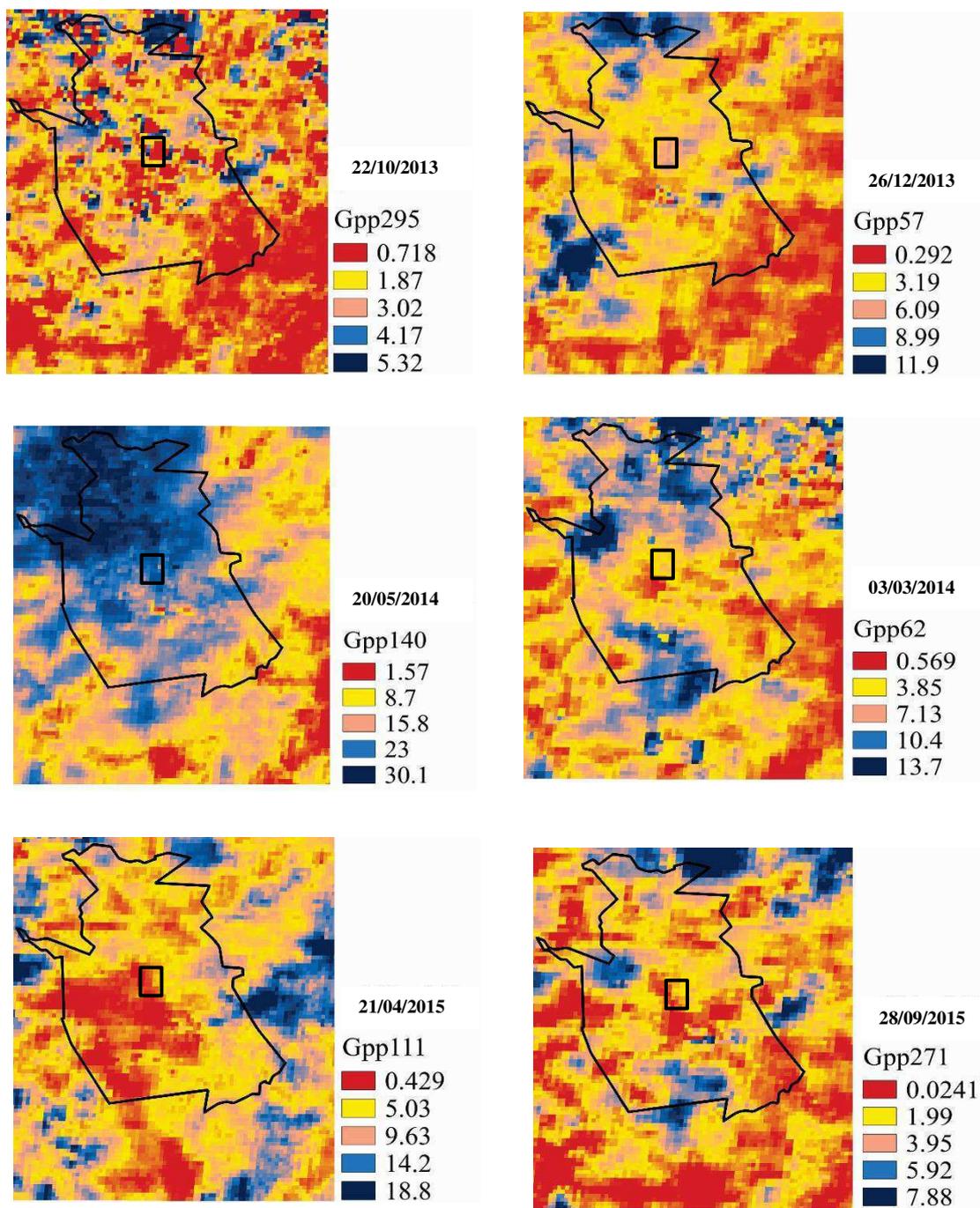


Figura 10 - PPB diário ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{dia}$) para o período de 2013 à 2015 na Área 2 nos dias de máxima e mínima precipitação (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

5.3.Precipitação x PPB

A Figura 11 ilustra a variabilidade média anual da PPB estimada/observada e medida com o total anual da precipitação. Observa-se que em média a PPB tem comportamento semelhante, pois quando a chuva aumenta/diminui a PPB aumenta/diminui, ou seja, existe uma influência direta nas distintas áreas, como já era esperado, pois quando chove a vegetação fica mais vigorosa, conseqüentemente absorve mais CO₂. Por exemplo, o ano de 2013 a precipitação justifica os valores máximos de PPB nos dias 105, 126, 142 e 240, sendo este o período de maior precipitação. O mesmo acontece para 2014, sendo que neste ano o pico máximo da absorção de carbono ocorreu no mês posterior ao mês de máxima precipitação, isso se justifica por se tratar do trimestre de maior índice pluviométrico. Em 2015, o dia 120 está entre os de maior PPB, ocorrendo no mês posterior ao de alta precipitação, isso é justificado porque a vegetação está mais vigorosa, aumentando a absorção do CO₂. Comportamento semelhante ocorre em 2016 e 2017 para a Área 1.

Na Área 2, o ano de 2014 respondeu melhor as chuvas, com máxima absorção de carbono no mês seguinte ao de maior pico de precipitação. Nos demais anos as oscilações foram mais sutis que o da Área 1. Isso mostra que o tempo de resposta da vegetação caatinga ocorreu um mês após as chuvas. Esses dados concordam com os encontrados por Santos (2015) que também encontrou resposta da vegetação caatinga no mês posterior ao da chuva. Braga (2000), em trabalhos desenvolvidos para a região Nordeste do Brasil usando dados de índices de vegetação obtidos de imagens satélites do AVHRR/NOAA, mostrou que as respostas da vegetação caatinga ocorriam um mês após as chuvas. O mesmo comportamento foi relatado por Costa (2017), usando dados do IVDN/MODIS para o estado da Bahia.

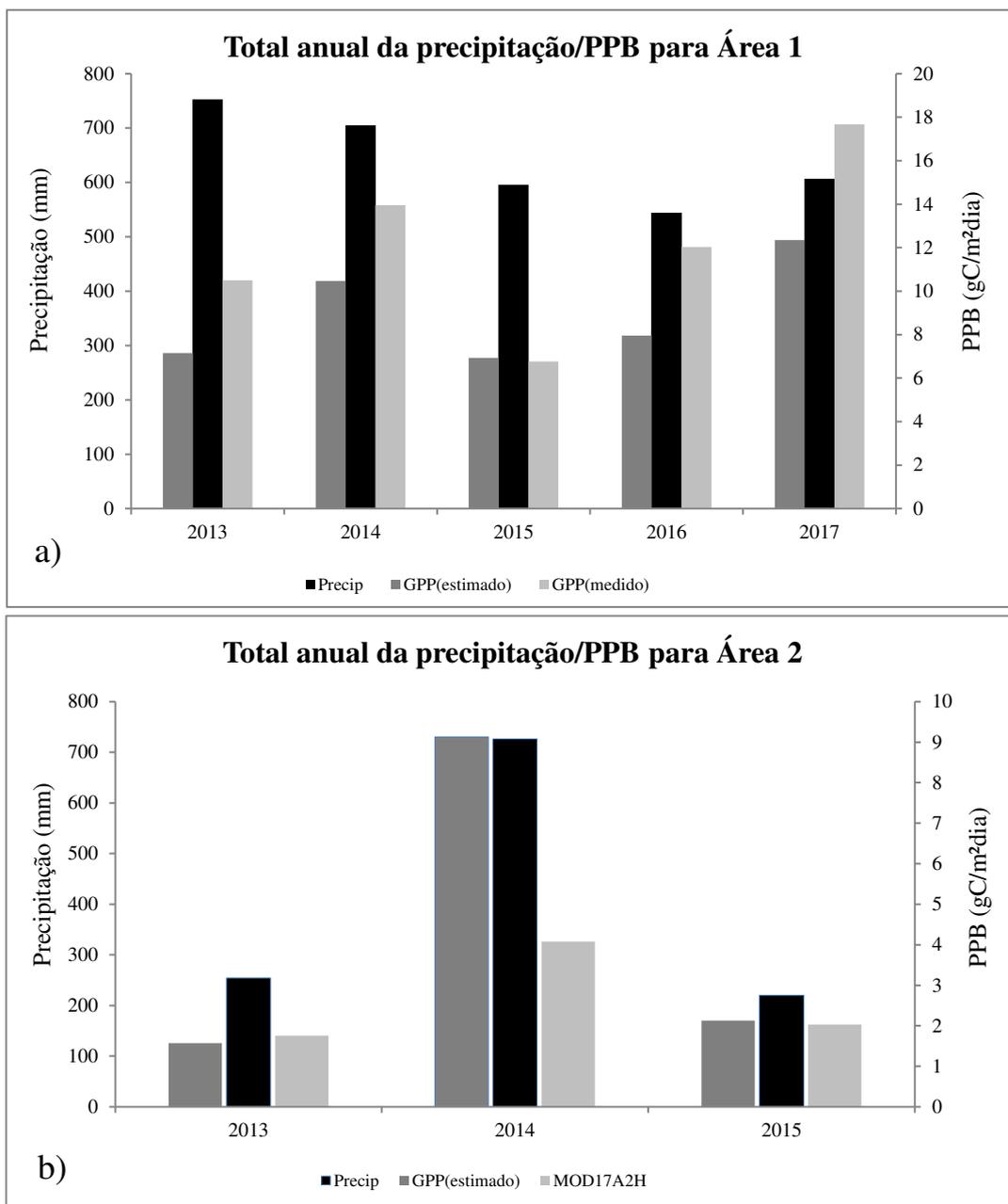


Figura 11 - Relação da PPB com a precipitação para o período de estudo na Área 1(a) e Área 2(b).

5.4.IVDN x PPB

A Figura 12 e 13 mostra a variabilidade temporal da PPB_{estimada} e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada IVDN obtidos a partir do Sensor MODIS/Terra para os anos estudados nas Áreas 1, 2. Como pode ser visto a precipitação e IVDN

também tem uma relação direta com PPB, isso já era esperado, pois o índice de vegetação é bom indicador da precipitação (BRAGA, 2000).

O índice de vegetação é uma variável utilizada no cômputo da RFAA, que por sua vez é empregada na determinação da PPB. Além disso, o IVDN mede o vigor da planta, a qualidade ambiental e a capacidade de absorção de biomassa, sendo esta ocasionada pelo processo de fotossíntese, responsável pela absorção do CO₂, medido através da PPB.

Para os anos estudados, os maiores valores em média de IVDN ocorreram em 2014, na Área 1 0,65 e Área 2 de 0,48. Os máximos e mínimos no período foram encontrados na Área 1, oscilando 0,35 e 0,82 e na Área 2 de 0,17 a 0,68 respectivamente. Pelo exposto a Área 1 apresentou maior vigor da vegetação, conseqüentemente maior captação de carbono. Isso se explica porque a Área 1 choveu mais que a Área 2.

Isso reflete na perda das folhas com a escassez de água, além disso deve-se considerar o estágio de conservação das mesmas. A Área 1 parece ser mais cuidada no que diz respeito as ações antrópicas do que a área 2, embora ambas sejam áreas em processo de conservação, entretanto essa informação ainda deve ser comprovada a partir de estudos de uso e ocupação das áreas, entre outros.

A relação entre $PPB_{estimada}$ x IVDN na Área 1 explica 68% da variância total dos dados da $PPB_{estimada}$ e IVDN e na Área 2 explica 81% da variância total da PPB e IVDN. Esses resultados concordam com os encontrados por Felix (2013) para área de caatinga no Semiárido Pernambucano para os anos de 1985 e 2009, demonstrando assim, que o IVDN pode ser usado como indicador da absorção do CO₂ de uma determinada região.

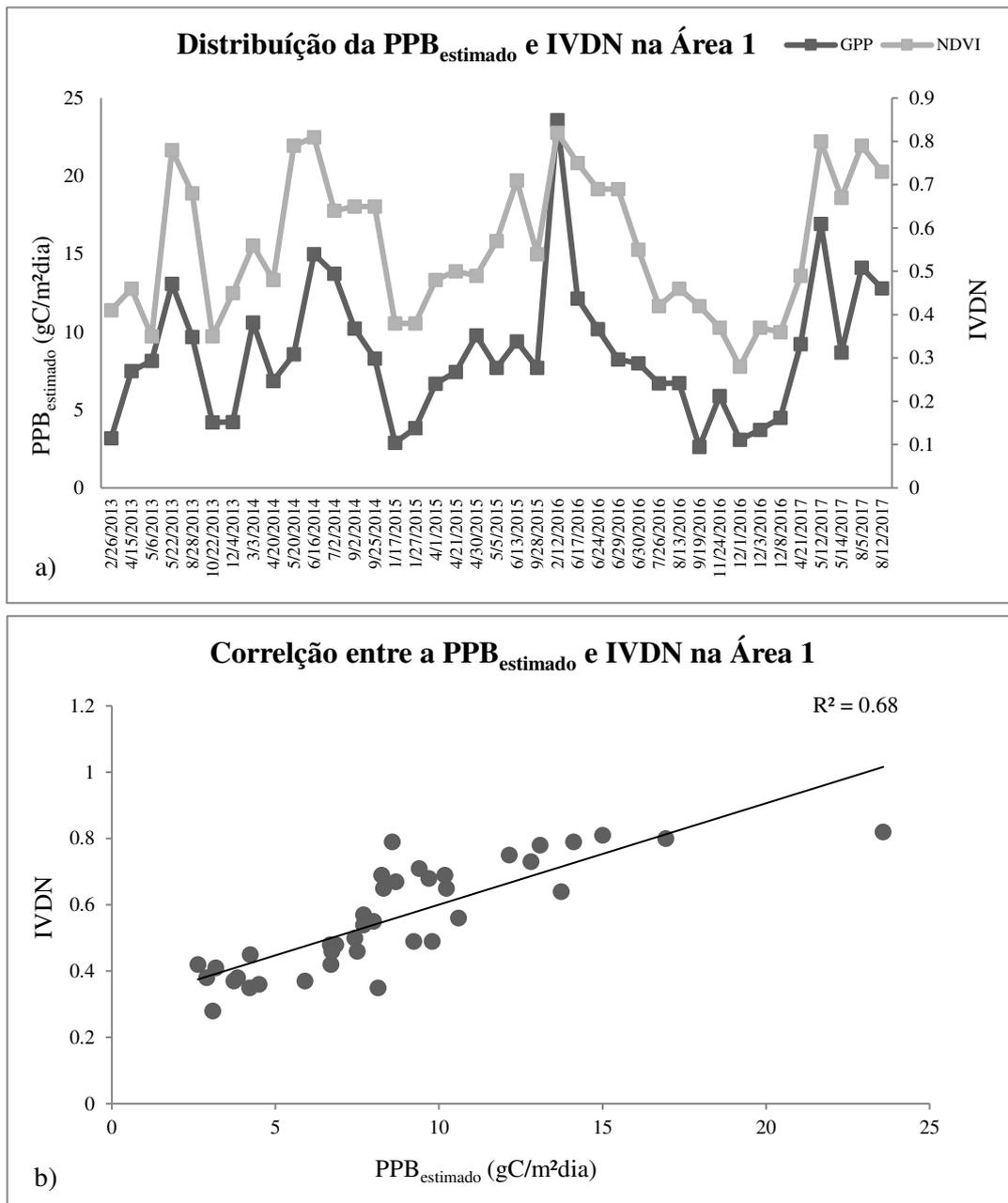


Figura 12 - (a) Variabilidade temporal da PPB e IVDN e (b) Diagrama de dispersão e curva de regressão da PPB ($gC/m^2/dia$) x IVDN para o período de 2013 a 2017 na Área 1.

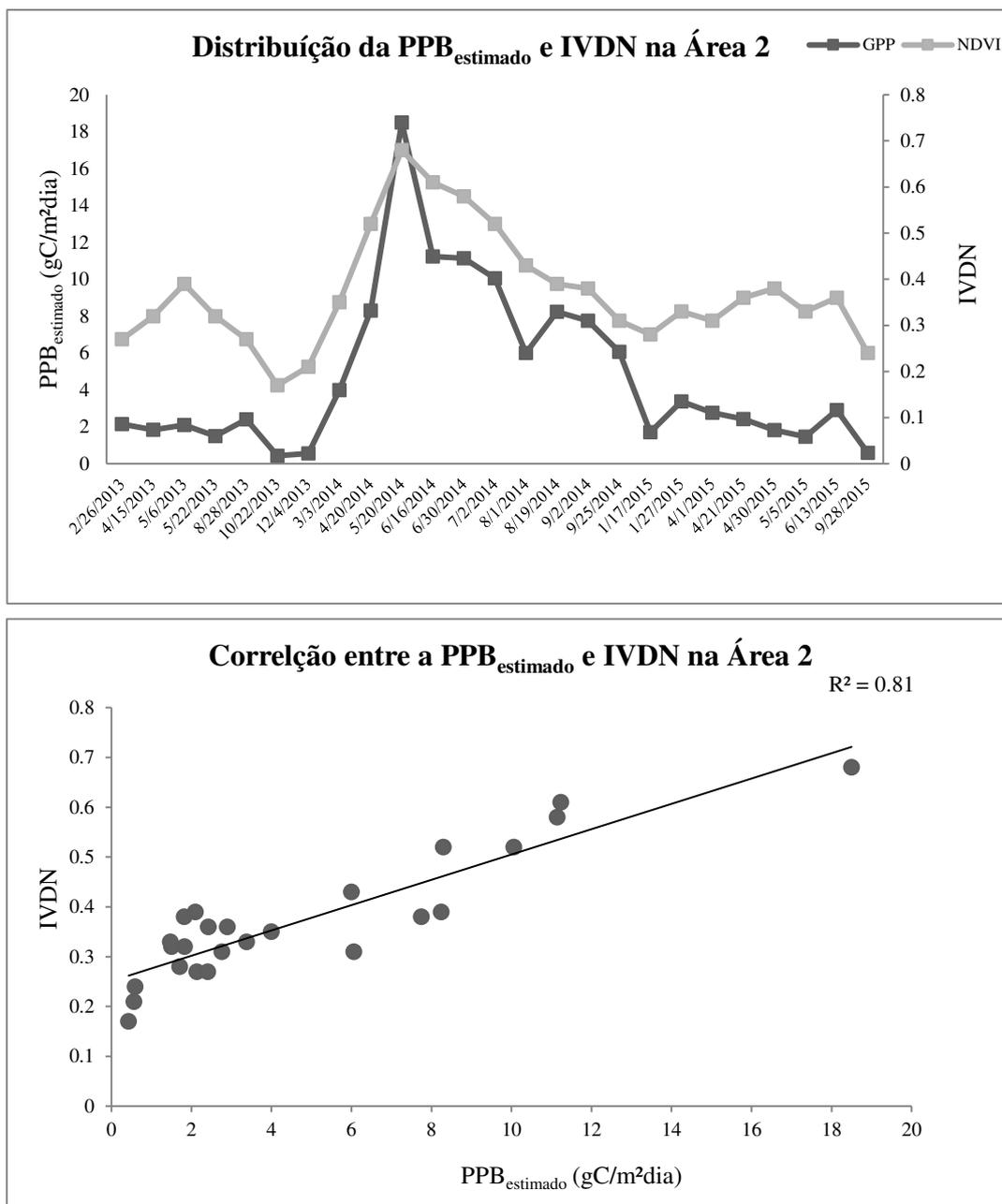


Figura 13 – (a) Variabilidade temporal do PPB e IVDN e (b) Diagrama de dispersão e curva regressão entre PPB (gC/m²dia) x IVDN para o período de 2013 a 2015 na Área 2.

Quando analisado os dados de PP_{medidos} na torre micrometeorológica (FIGURA 14), os mesmos se comportam de forma semelhante, comprovando a influência do parâmetro IVDN na determinação da PPB, por sua vez demonstrando a representatividade que o vigor foliar tem na absorção do carbono, devido a este estar diretamente relacionado ao processo fotossintético da planta.

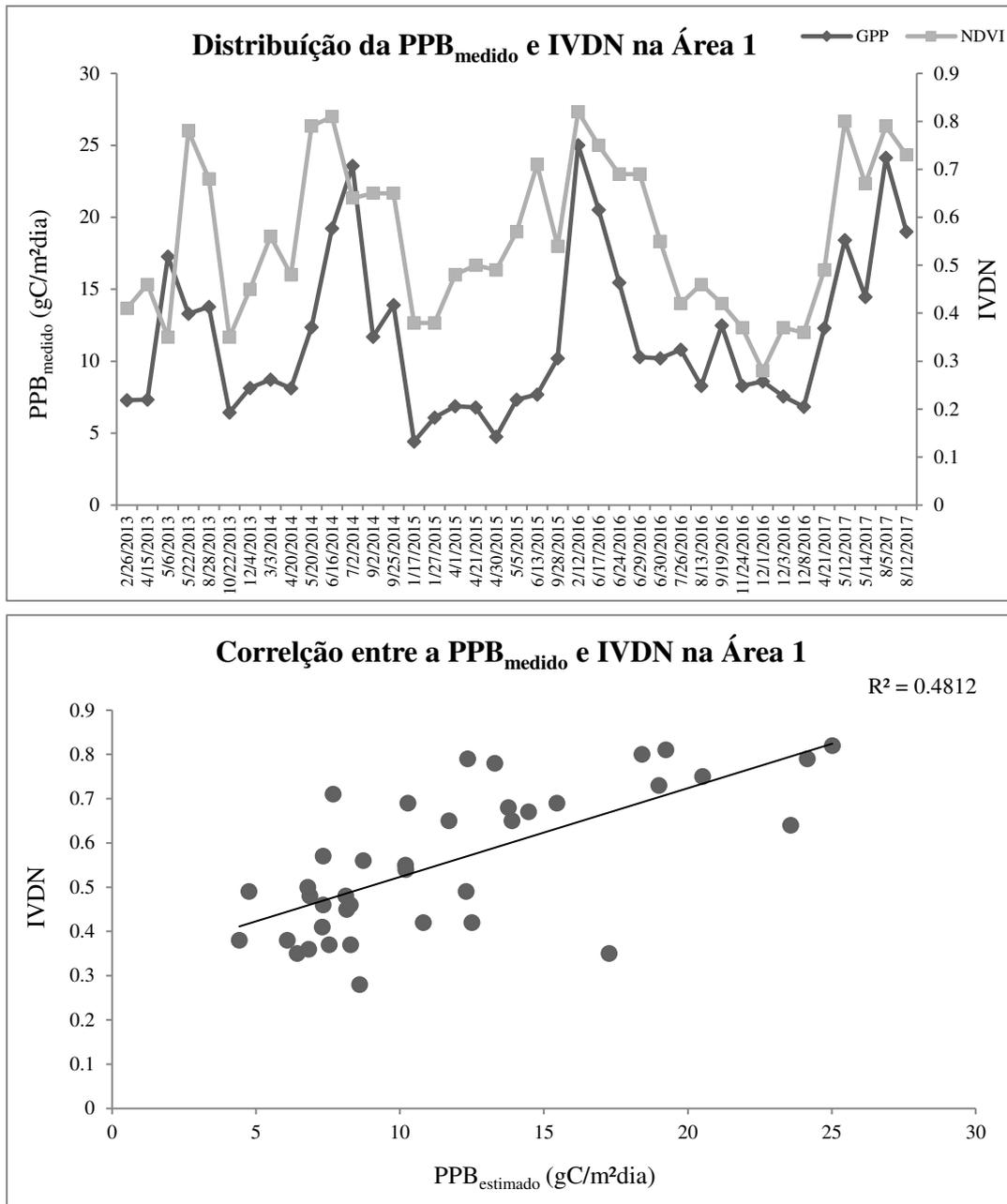


Figura 14 - (a) Variabilidade temporal do PPB_{medido} e IVDN e (b) Diagrama de dispersão e curva regressão entre PPB_{medido} (gC/m²dia) x IVDN para o período de 2013 a 2017 na Área 1.

A relação entre PPB_{medida} e IVDN explica apenas 48% da variância total dos dados, o que pode ser justificado pelo fato de três dias (DOA 126, 183, 336) mascararem essa correlação. Por sua vez, isso não reduz a significância da variável IVDN para a captação da biomassa. A relação entre PPB_{medido} e IVDN foi realizado

apenas para a Área 1 devido ao fato de apenas nesta área se ter os dados de fluxo de carbono medido em torre micrometeorológica.

5.5. Produtividade Primária Líquida (PPL)

A PPL é um parâmetro que determina a quantidade de CO₂ líquido que foi absorvida pela vegetação. As plantas absorvem carbono e fotossintetizam, durante esse processo parte do carbono é absorvido pela estrutura celular e parte volta para a atmosfera através da respiração autotrófica. A fração absorvida é determinada de PPL, expressada por: $PPL = PPB - Re$. Logo, a PPL é o total de CO₂ retirado da atmosfera. Na Figura 14 estão apresentados os valores diários para os dias dos anos estudados (2013 a 2017). Com base nos dados da estação micrometeorológica do INSA, pelo método EC determinou-se o PPL para a área 1 (Agreste) situada na localidade de Campina Grande-PB. Os valores médios de PPL são da ordem de 3,53 gC/m²dia em 2013; 4,33 gC/m²dia em 2014; 1,65 gC/m²dia em 2015; 3,43 gC/m²dia em 2016 e 4,42 gC/m²dia em 2017.

Em termos anuais o ano com maior PPL de 41,24 gC/m²dia foi em 2016, proporcionado pelas chuvas, que por sua vez favoreceram o desenvolvimento da caatinga. Em contrapartida o de menor PPB de 13,24 gC/m²dia ocorreu 2015 pela falta de chuva. Grande parte dos anos desse período de estudo responderam a influência da chuva, exceto o ano de 2015. A quantidade de carbono retida ao longo dos 5 anos de estudo foi igual a 131,6 gC/m²ano. Esses valores foram menores do que os encontrados por Morais et al. (2017) em área de caatinga conservada em Petrolina nos anos de 2011 e 2012 através do MODIS, entretanto apresentou comportamento semelhante na resposta ao estímulo da precipitação.

Embora esses anos tenham sido considerados secos quando comparados com a climatologia local, não favorecendo a máxima fotossíntese das plantas, estas continuam absorvendo CO₂, contribuindo assim para a manutenção atmosférica, o que favorece no controle térmico da região. Os valores de Re no período estudado foram maiores que PPL, totalizando 326,4 gC/m² e 131,6 gC/m², respectivamente, evidenciando que o ecossistema emitiu mais CO₂ através da respiração do que absorveu. Uma justificativa

plausível que se deve levar em consideração foi a baixa pluviosidade nestes anos. Além disso, a R_e medida na torre micrometeorológica é contabilizada a partir da soma da respiração autotrófica e da respiração heterotrófica ($R_e = R_a + R_h$), o que impossibilita a determinação de qual componente do ecossistema está contribuindo mais para a emissão do CO_2 . Esses resultados devem ser levados em consideração, pois o período da pesquisa ocorreu em anos de pouca chuva e altas temperaturas, condições em que a vegetação perde suas folhas fotossintetizando menos.

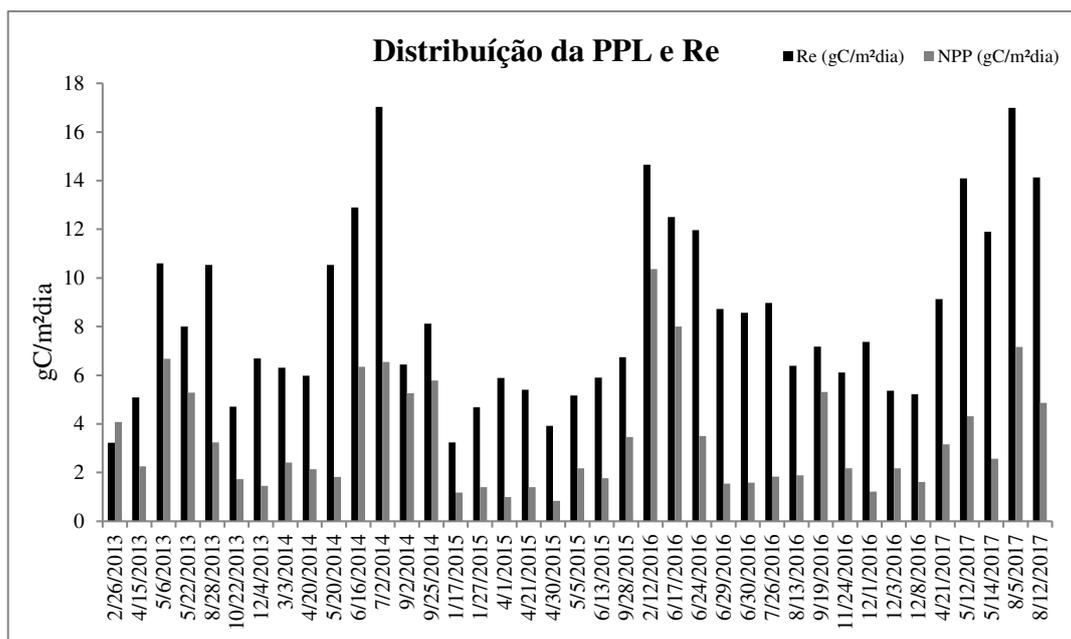


Figura 15 - Valor total diário da PPL (Produtividade Primária Líquida) e R_e (Respiração) para o período de 2013 à 2017 na área 1.

Ainda outro fator a ser levado em consideração é a eficiência fotossintética (Eficiência quântica do fotossistema II). Mesmo sendo comprovada, indiscutivelmente, a capacidade adaptativa da caatinga, existem espécies da mesma que têm seu sistema fotossintético comprometido quando em condições de estresse, tanto hídrico como também de temperatura, quando estes ocorrem fora do padrão em uma região específica. Isto pode ter acarretado na redução da capacidade fotossintética da vegetação, por sua vez na baixa absorção do CO_2 , comportamento observado neste estudo.

A estimativa da PPL não foi realizada para a Área 2 devido a indisponibilidade de dados de fluxo de carbono na torre.

6. CONCLUSÃO

Quando em condições climáticas desfavoráveis, a caatinga capta baixos teores de CO₂, chegando a contribuir para a emissão do mesmo na área de estudo, o que nos mostra a importância de sua conservação, para que possa aumentar sua contribuição na absorção do CO₂.

Concluimos ainda que, houve grande influência das variáveis climáticas precipitação e temperatura na capacidade fotossintética da vegetação, sendo que a maior quantidade de PPB está relacionada a maior quantidade de precipitação. O IVDN é um parâmetro de grande influência na determinação da PPB, sendo que os valores de IVDN na área 2 explicaram 82% da PPB, superior ao da área 1 que explicou 68%.

Por fim, é de extrema importância que a Caatinga seja conservada e protegida, pois esta contribui, mesmo em condições adversas, para a redução de um dos GEE, contribuindo assim para o equilíbrio climatológico do planeta. Além disto, pode-se perceber a heterogeneidade desta vegetação.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G., TREZZA, R. & TASUMI M. Surface energy balance algorithms for land. **Advance training and users manual**, version 1.0, pp.98, 2002.

ANDRADE-LIMA, D. The caatingas dominium. *Revista Brasileira de Botânica*, p. 149-163, 1981.

_____. *Plantas das caatingas*. Rio de Janeiro, 1989. 243 p.

ARAÚJO, F. S.; RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V.; MARTINS, F. R. Repartição da flora lenhosa no domínio da Caatinga. In: ARAÚJO, F. S.; RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V. (orgs.). **Análise das variações da biodiversidade do Bioma Caatinga: suporte a estratégias regionais de conservação**. Brasília (DF): Ministério do meio Ambiente, 2005. p. 15-33.

ARAÚJO, S.M.S. A região semiárida do nordeste do brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. **Rios Eletrônica**, n. 5. 2011.

ARAÚJO, S. M. S. de. **Ecodinâmica e degradação ambiental no Setor Sul de Belém de São Francisco-PE**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. 1996. 168 p.

BARKER, J.L., HARDEN, M.K., ANUTA, E. A., SMID, J. E., HOUGHT, D. MODIS Spectral Sensivity Study: Requirements and Characterization. 84p. 1992.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 94, p.321-340, 2003.

BARBOSA, M. R. V.; LIMA, I. B.; LIMA, J. R. CUNHA, J. P. AGRA, M. F. T, W. W. **Vegetação e flora no Cariri paraibano**. Ed. EDUEPB. Campina Grande. 120 p. 2007.

BRAGA, C. C. **Inter-Relações entre Padrões de Índice de Vegetação e de pluviometria no Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2000. 124p.

BRASIL. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca/PAN-Brasil**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos, 2004. 214p.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H. C.; LIGO, M. A. V.; RAMOS, N. P.; PACKER, A. P.; BATISTA, E. R. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.182-183, p. 54-66, 2013.

CHAVES, I. D.; FRANCISCO, P. R. M.; LIMA, E. R. V.; CHAVES, L. H. G. Modelagem e mapeamento da degradação da Caatinga. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 183 – 195, 2015.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. de; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A. de; ARAUJO, J. L. P. A região semiárida brasileira. In: VOLTOLINI,

T. V. (Ed.). **Produção de caprinos e ovinos no Semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. cap. 1, p. 21-48.

COSTA, W. L. B. Resposta de índices de vegetação às precipitações em regiões do estado da Bahia. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017. 80p.

DAUGHTRY C.S.T.; McMURTREY III, J. E.; CHAPPELLE, E. W.; DULANEY, W. P.; IRONS, J. R.; SATTERWHITE, M. B. Potential for discriminating crop residues from soil by reflectance and fluorescence. **Agronomy Journal**, v.87, n.2, p.165-171, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Geotecnologias e geoinformação: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. TÔSTO, S. G.; RODRIGUES C. A. G.; BOLFE E. L.; BATISTELLA M. Brasília, DF. 2014. 248 p. ISBN 978-85-7035-321-4

FELIX, M. V. B. **Variabilidade espaço temporal do estoque de carbono e índice de vegetação em uma área de caatinga por meio de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2013, 57p.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.74-88, 1995.

FIGUEIREDO, J. M; ARAÚJO, J. M; PEREIRA, O.N., BAKKE, I. A.; BAKKE, O.A. Revegetation of degraded Caatinga sites. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 24, n. 3, p.332–343, 2012.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. Aptidão climática do estado da Paraíba para as principais culturas agrícolas. **Areia: UFPB**, 120 p. 2018.

GARBULSKY, M. F.; PEÑUELAS¹, J.; DARIO, P. ; ARDÖ, J.; GOULDEN, M. L.; KIELY, G.; RICHARDSON, A. D.; ROTENBERG, E.; VEENENDAAL, E. M.; FILELLA, I. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, p. 253-267, 2010.

GUERRA, R. A. T. Ciências biológicas. Ed. **Universitária/UFPB**. 422p. João Pessoa, 2010.

GRILO, D. C.; FRANCA-ROCHA, W. J. S.; BORGES, E. F.; PETRERE, V. G.; ARAÚJO, D. M. B. Mapeamento do fluxo de CO₂ em ambientes de caatinga e de sistemas agropecuário por meio de imagens orbitais. *Anais...15 Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Curitiba, p. 1682, 2011.

IBGE. **Portaria N° 89, de 16 de março de 2005, do Ministério da Integração Nacional**. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/semiariado.shtm?c=4> Acessado em 01/02/2018.

IBRAHIM, A.B. An Analysis of Spatial and Temporal Variation of Net Primary Productivity over Peninsular Malaysia Using Satellite Data. Ph. D. Thesis, **University Teknologi Malaysia**, Johor, Malaysia, 2006.

IMAFLORA- **Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola. Documento de análise: evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970-2013), setor agropecuário.** São Paulo, 2015. 57p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2010. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/campina-grande/panorama>> Acessado em 15/06/2018.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2017. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/campina-grande/panorama>> Acessado em 15/06/2018.

Instituto Nacional do Semiárido-INSA. **O Semiárido brasileiro: riquezas, diversidades e saberes.** 75p., n1. 2013.

KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; SILVA, P. P. M. Aspectos fisiológicos e ambientais da fotossíntese. **Revista Virtual de Química.** p. 56-73, v. 7, n. 1. Piracicaba, 2015.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço e Geografia.** v. 6, nº 1, ISSN: 1516-9375. São José dos Campos, 2003.

LIMEIRA, R. C. **Variabilidade e tendência das chuvas no estado da Paraíba.** Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2008, 122p.

MACHADO, C. C. C. Alterações da superfície do Parque Nacional do Catimbau (PE-Brasil): consolidação dos aspectos biofísicos na definição dos indicadores ambientais do Bioma Caatinga. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, 222 p. 2014.

MILLER, G.T. *Ciência Ambiental.* São Paulo. **Cengage Learning**, p.57-58. 2008.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, v.9, p.747-766, 1972.

MORAIS, Y. C. B.; ARAÚJO, M. S. B.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R. Q. Análise do sequestro de carbono em áreas de Caatinga do Semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, 14p., 2017.

MOREIRA, A. **Caracterização fenológica de tipologias campestres do Rio Grande do Sul a partir de produtos MODIS (IVDN, EVI E PPB).** Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018, 132p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação.** São José dos Campos: Parêntese, 2010.

PONZONI, F. J. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação: diagnosticando a Mata Atlântica. São José dos Campos. **INPE**, cap. 18, 2002.

RICKLEFS, R. E. *The Economy of Nature*. 6. ed. New York, W. H. Freeman, p. 416, 2010.

RICKLEFS, R. E. *A economia da natureza. Guanabara Koogan*. ed. 6, p. 45-437, ISBN 978-85-277-1677-2. Rio de Janeiro, 2012.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 214p., 2004.

RODRIGUES, C.C. F. **Produtividade Primária Bruta para áreas de cana-de-açúcar e cerrado na Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu – SP**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Campina Grande. 73p., 2018.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, v. 25, p. 147- 157, 2000.

ROSENDO, J. dos S. **Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis**. 2005. 130 p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005.

Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/12466122/indices-de-vegetacao-e-monitoramento-do-uso-do-solo-e-cobertura-/67>> Acessado em 10/04/2018.

SAMPAIO, E. V. S. B. Caracterização do Bioma Caatinga: características e potencialidades. p. 29-48. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (Eds.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília, 2010.

SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo do dióxido de carbono dentro da Floresta Amazônica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 87p. 1999.

SANTOS, F. A. C. **Estimativa dos fluxos de CO₂ e evapotranspiração em áreas de caatinga em recuperação e degradada no estado da Paraíba**. 2015. 125 p. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Campina Grande. 2015.

SENAR-Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Técnicas de produção vegetal**. Brasília, 2015. 150 p.

SILVA, C. A. **Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. – em nível de árvore para amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR**. Piracicaba, 2013. Dissertação de (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2013.

SILVA, B. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. O.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da Produtividade Primária Bruta do perímetro irrigado São Gonçalo-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, 2013.

SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America. **Springer**, 2017.

SILVA, K. K. **Comportamento fenológico de Mimosa ophthalmocentra Mart. Ex Benth. em uma área de Caatinga no semiárido paraibano, Brasil.** Monografia (Baixarel)-Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

SILVA, S. C. P. **Modelagem espectral para determinação da concentração e fluxo de CO₂ em paisagens naturais e antrópicas na região Amazônica.** 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Brasília, 173 p. 2014.

SOUZA, B. I.; ARTIGAS, R. C.; LIMA, E. R. V. Caatinga e desertificação. **Mercator**, v. 14, n. 1, p. 131-150. Fortaleza, 2015.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – SUDENE. Nova delimitação Semiárido. 63 p. 2018.

TAÍZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. **Artmed**, 5 ed., 918 p., 2013.

TASUMI, M., ALLEN, R. G., TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.13, p.51-63, 2008.

TERRA. The EOS Flagship. Disponível em <<https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>> Acessado em 02/06/2018.

TOWNSEND, C. R.; BEGON, M.; HARPER, J. L. Fundamentos em ecologia. **Artmed**. ed.2, p. 122-497, ISBN 85-363-0602-5. Porto Alegre, 2006.

VELASQUE, M. C. S. **Estimativa da variação anual da Produção Primária Bruta em floresta de transição amazônica-cerrado.** 2013. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Mato Grosso. Cuiabá, 56 p. 2013.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.** 2. ed. London, Academic Press, 2006. 649p.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

APÊNDICE A – Parâmetros diários utilizados para determinação da PPB ($\text{gC/m}^2\text{dia}$) no período de 2013-2017 na área 1 através da metodologia proposta.

ÁREA 1								
DATA	DOA	α Tasumi et al. (2008)	IVDN	R_{s24h} W/m ²	λ	ϵ gC/m ²	RFA W/m ²	RFAA W/m ²
26/02/2013	57	0,13	0,41	439	0,31	0,5	210,76	73,33
15/04/2013	105	0,12	0,46	427,72	0,66	1,0	205,31	86,67
26/04/2013	126	0,22	0,35	427,3	1,0	1,0	205,10	56,43
22/05/2013	142	0,09	0,79	400,54	0,58	0,96	192,26	157,18
28/08/2013	240	0,11	0,68	401,49	0,5	0,85	192,71	132,63
22/10/2013	295	0,08	0,35	364,83	0,6	1,0	175,12	48,14
04/12/2013	338	0,13	0,45	473,95	0,33	0,54	227,5	91,09
03/03/2014	62	0,17	0,56	468,35	0,63	1,0	224,81	123,19
24/04/2014	110	0,13	0,48	407,1	0,57	0,91	195,4	87,158
20/05/2014	140	0,13	0,79	347,06	0,43	0,71	166,59	139,39
16/06/2014	167	0,15	0,81	326,33	0,76	1,0	156,64	134,26
02/07/2014	183	0,18	0,64	301,22	1,0	1,0	144,58	92,85
02/09/2014	245	0,13	0,65	434,61	0,52	0,87	208,61	136,31
25/09/2014	268	0,13	0,65	443,06	0,40	0,69	212,67	140,4
17/01/2015	17	0,14	0,38	367,02	0,38	0,61	176,17	55,14
27/01/2015	27	0,1	0,38	460,8	0,39	0,64	221,18	69,7
01/04/2015	91	0,1	0,61	422,09	0,39	0,64	202,6	121,83
21/04/2015	111	0,12	0,5	420,26	0,57	0,92	201,72	93,75
30/04/2015	120	0,14	0,49	427,56	0,75	1,0	205,23	92,84
05/05/2015	125	0,12	0,57	408,76	0,5	0,83	196,2	107,71
13/06/2015	164	0,11	0,71	369,45	0,49	0,84	177,34	130,34
28/09/2015	271	0,13	0,54	409,65	0,52	0,88	196,63	101,98
12/02/2016	43	0,17	0,82	485,75	0,79	1,0	233,16	203,6
17/06/2016	169	0,11	0,75	402,46	0,54	0,93	193,18	151,34
24/06/2016	176	0,12	0,69	351,03	0,57	0,98	168,49	119,78
29/06/2016	181	0,11	0,69	415,71	0,39	0,68	199,54	140,52
30/06/2016	182	0,17	0,55	388,25	0,54	0,94	186,36	97,82
26/07/2016	208	0,09	0,42	392,18	0,65	1,0	188,24	67,82
13/08/2016	226	0,13	0,46	429,45	0,52	0,9	206,14	86,98

19/09/2016	263	0,1	0,42	489,55	0,21	0,36	234,98	85,15
24/11/2016	329	0,12	0,37	460,94	0,59	0,9	221,25	68,331
01/12/2016	336	0,12	0,28	467,32	0,49	0,82	224,31	43,47
03/12/2016	338	0,14	0,37	462,81	0,38	0,64	222,15	67,43
08/12/2016	343	0,12	0,36	480,24	0,46	0,76	230,52	68,32
21/04/2017	111	0,2	0,49	400,5	0,77	1,0	192,24	86,48
12/05/2017	132	0,13	0,8	433,3	0,68	0,91	207,98	174,7
14/05/2017	134	0,15	0,67	396,88	0,48	0,77	190,5	129,41
05/08/2017	217	0,12	0,79	424,57	0,57	0,97	203,8	168,87
12/08/2017	224	0,13	0,73	413,6	0,54	0,92	198,53	151,31

APÊNDICE B – Parâmetros diários utilizados para determinação da PPB ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{dia}$) no período de 2013-2015 na área 2 através da metodologia proposta.

ÁREA 2								
DATA	DOA	α Tasumi et al. (2008)	IVDN	R_{s24h} W/m ²	Λ	ϵ gC/m ² dia	RFA W/m ²	RFAA W/m ²
26/02/2013	57	0,21	0,27	597,91	0,29	0,47	286,9	52,38
15/04/2013	105	0,2	0,32	532,72	0,29	0,35	255,71	60,55
06/05/2013	126	0,15	0,39	399,23	0,22	0,38	191,63	63,66
22/05/2013	142	0,13	0,32	455,83	0,23	0,32	218,8	53,47
28/08/2013	240	0,16	0,27	429,86	0,19	0,75	206,33	37,12
22/10/2013	295	0,19	0,17	522,45	0,44	0,37	250,78	13,25
04/12/2013	338	0,22	0,21	588,12	0,22	0,23	282,3	28,87
03/03/2014	62	0,22	0,35	510,27	0,44	0,68	244,93	67,61
20/04/2014	110	0,2	0,52	394,32	0,66	1,0	189,27	92,31
20/05/2014	140	0,17	0,65	493,86	0,82	1,0	237,05	154,63
16/06/2014	167	0,17	0,61	462,22	0,57	0,96	221,85	176,63
30/06/2014	181	0,15	0,58	478,31	0,58	0,9	229,59	129,33
02/07/2014	183	0,17	0,52	455,42	0,64	1,0	218,6	108,15
01/08/2014	213	0,16	0,43	414,07	0,54	0,91	198,75	76,09
19/08/2014	231	0,17	0,39	489,3	0,71	1,0	234,86	77,92
02/09/2014	245	0,18	0,38	520,75	0,69	1,1	249,96	78,28
25/09/2014	268	0,19	0,31	540,96	0,69	1,0	259,66	60,64
17/01/2015	17	0,22	0,28	589,81	0,23	0,38	283,11	52,63
27/01/2015	27	0,14	0,3	483,1	0,46	0,77	231,89	50,96
01/04/2015	91	0,15	0,31	541,15	0,33	0,54	259,75	59,31
21/04/2015	111	0,17	0,36	533	0,22	0,37	255,84	75,61
30/04/2015	120	0,19	0,38	486,16	0,17	0,28	233,36	74,56
05/05/2015	125	0,17	0,33	506,59	0,17	0,28	243,16	61,48
13/06/2015	164	0,14	0,36	437,89	0,33	0,56	210,18	59,99
28/09/2015	271	0,21	0,24	594,4	0,10	0,18	285,31	38,52