



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

YGOR CRISTIANO BRITO MORAIS

**VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA NO
BIOMA CAATINGA**

Recife

2019

YGOR CRISTIANO BRITO MORAIS

**VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA NO
BIOMA CAATINGA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvínio

Coorientadora: Profa. Dra. Magna Soelma Beserra de Moura

Recife

2019

YGOR CRISTIANO BRITO MORAIS

**VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA NO
BIOMA CAATINGA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 27/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Werônica Meira de Souza (Examinadora Interna)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Vlândia Pinto Vidal de Oliveira (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Rodrigo de Queiroga Miranda (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho a minha mãe, que sempre fez tudo por mim, a minha esposa e a minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelas oportunidades que me foram dadas ao longo da vida e por sabedoria, sobretudo, nos momentos mais adversos.

À minha mãe e família por toda formação pessoal, educação e ensinamentos que me permitiram chegar até aqui.

À minha esposa, Jacicleide Ramos, por estar sempre ao meu lado seja qual for o momento, pelo companheirismo e por entender todas as dificuldades e estresses do dia-a-dia. Te amo!

À Universidade Federal de Pernambuco por contribuir com minha formação profissional e pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco pelo financiamento desta pesquisa, com a disponibilização de uma bolsa de estudos mensal, por meio do processo IBPG-0501-1.07/14.

À Professora Josiclêda Domiciano Galvêncio pelos ensinamentos e por oportunizar o desenvolvimento e concretização deste e de outros trabalhos desenvolvidos ao longo do curso. E, também, por ter me dado a oportunidade de fazer parte do SERGEO desde o ano de 2010, o que foi fundamental para minha formação acadêmica e pessoal.

À Professora Magna Soema Beserra de Moura também pelos ensinamentos, orientações e disponibilização de todos os dados medidos em torre micrometeorológica utilizados nessa pesquisa. Com certeza, sem a sua ajuda, a concretização deste trabalho como se encontra não seria possível.

À Professora Werônica Meira de Souza e ao Professor Emanuel Araújo Silva pelas contribuições dadas ao longo dos Seminários de Tese e da qualificação. Por dedicar de tempo para contribuir com o desenvolvimento dessa pesquisa e pela compreensão com os imprevistos ocorridos ao longo de todo esse processo.

Ao Professor Rodrigo de Queiroga Miranda pelas considerações oficiais dadas ao trabalho durante os Seminários e qualificação. E, logicamente, pela amizade desenvolvida ao longo dos últimos seis anos e por todas as sugestões e discussões acerca dos trabalhos e de diversos outros temas que foram fundamentais para aprofundar meus conhecimentos em sensoriamento remoto, técnicas de processamento de imagens e estatística.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, em especial Jadson Freire, Carlos Lima, Elisabeth Regina, Josimar Reis, Pedro Brito, Sidney Campelo, Henrique Ferreira, Pedro Ferreira, Viviane Gomes e Tayram.

À minha amiga de SERGEO e de turma Yenê Paz pelas discussões acadêmicas, sugestões e dúvidas esclarecidas sobre determinados assuntos. Pelos momentos de lazer e companheirismo ao longo de todo curso, nas disciplinas, no laboratório e nos momentos extra universidade.

Ao meu amigo Pedro Paulo Lima, primeiramente, por ter sido responsável por me ‘apresentar’ o sensor MODIS como possibilidade de aplicação nos estudos de sensoriamento remoto. Pela amizade, companheirismo, pelas conversas sobre a vida e pelas discussões acadêmicas sobre nossos trabalhos, seja na universidade, nos trabalhos de campo ou pela rua. Pela ajuda no processamento e organização dos dados medidos na torre.

A todos que já passaram pelo SERGEO ao longo desses nove anos, que contribuíram para minha formação acadêmica, através dos primeiros ensinamentos sobre sensoriamento remoto e geoprocessamento que permitiram a publicação dos meus primeiros artigos e o aprendizado dos softwares tão úteis nos nossos trabalhos. Destaco, em especial, Antonio Marcos, Tiago Henrique e Hewerton Alves.

E, por fim, aos meus amigos da turma do doutorado do PRODEMA, pelos momentos de discussão, sobretudo nas disciplinas e nas horas vagas, em especial a Valério Marcelo pelas conversas, apoio durante a realização deste trabalho e de outras obrigações inerentes ao curso.

Muito obrigado!

RESUMO

A produção primária bruta é uma componente chave do ciclo global do carbono, sobretudo em relação aos estudos de mudanças climáticas, uma vez que está diretamente relacionada ao carbono efetivamente extraído da atmosfera pelos ecossistemas terrestres. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo geral analisar a variação espacial e temporal da produção primária bruta no bioma Caatinga. Foram usados os produtos de sensoriamento remoto, sendo eles: MO17A2H (produção primária bruta - GPP), MO15A2H (índice de área foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida - fAPAR) e MOD09 (refletância da superfície). As estimativas de GPP foram validadas por meio de dados de fluxos de carbono, água e energia, medidos por um sistema de vórtices turbulentos, instalado em torre micrometeorológica da Embrapa Semiárido – Petrolina/Pernambuco. Foram realizadas, ainda, três novas estimativas de GPP, utilizando (1) dados meteorológicos locais, (2) dados meteorológicos e fração evaporativa como reguladora da eficiência do uso da luz (LUE), e (3) dados meteorológicos locais, fração evaporativa e o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) na estimativa da fAPAR, sendo que para cada estimativa foram realizados dois cálculos com valores diferentes de eficiência máxima de uso da luz. Em uma segunda etapa, a GPP foi analisada para todo o bioma Caatinga (2001 a 2016), estabelecendo relações com a variabilidade da precipitação, tipos de solo e com o uso e cobertura da terra. Os resultados mostraram que houve o algoritmo MODIS-GPP apresentou um desempenho moderado ($r^2 = 0,505$, $p < 0,0001$, $REQM = 1,81 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), com subestimativa dos valores de GPP durante os períodos com maior ocorrência de chuvas e com superestimativa durante a estação seca. A estimativa da GPP com dados meteorológicos locais não melhorou os resultados ($r^2 = 0,31$; $p < 0,0001$; $REQM \text{ GPP}_{\text{otm_local1}} = 1,98 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $REQM \text{ GPP}_{\text{otm_local2}} = 2,65 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Quando o algoritmo MO17 foi calculado utilizando a fração evaporativa, os resultados foram melhores com o uso do EVI ($r^2 = 0,83$, $p > 0,001$, $REQM = 1,47 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e com o próprio fAPAR_{mod15} ($r^2 = 0,71$, $p < 0,0001$, $REQM \text{ GPP}_{\text{otm_fapar1}} = 2,077 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $REQM \text{ GPP}_{\text{otm_fapar2}} = 1,36 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Além disso, a comparação com os dados mensais apresentou desempenho melhor para todas as estimativas. No que se refere a variação espacial e temporal da GPP para todo bioma Caatinga, verificou-se uma forte relação com a precipitação pluviométrica ($r^2 = 0,83$, para a correlação com os dados médios). A GPP variou espaço-temporalmente de acordo com um gradiente de umidade e, além disso, os maiores valores foram registrados em regiões de altitude mais elevada. Quando a GPP foi analisada a partir de transectos latitudinais e longitudinais, evidenciou-se uma maior influência da antropização da

caatinga na GPP acumulada ao longo de 2001 a 2016, onde as áreas mais fragmentadas e/ou com presença de agropecuária apresentaram menores valores acumulados de GPP. Por fim, a precipitação foi a principal condicionante da variação temporal da GPP da caatinga.

Palavras-chave: Caatinga. Carbono. Meio ambiente. Produção primária. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Gross primary production is a key component of the global carbon cycle, especially in relation to climate change studies, as it is directly related to the carbon actually extracted from the atmosphere by terrestrial ecosystems. Thus, we analyzed the spatial and temporal variation of the crude primary production in the Caatinga biome. We used the remote sensing products: MO17A2H (gross primary production - GPP), MO15A2H (leaf area index and fraction of photosynthetically active radiation absorbed - fAPAR) and MOD09 (surface reflectance). The GPP estimates were validated by data of carbon, water and energy fluxes, measured by a turbulent vortex system, installed in a micrometeorological tower of Embrapa Semiárido - Petrolina/Pernambuco. In addition, three new GPP estimates were used, using (1) local meteorological data, (2) meteorological data and evaporative fraction as a regulator of light use efficiency (LUE), and (3) local meteorological data, evaporative fraction and the Enhanced Vegetation Index (EVI) in the estimation of fAPAR, and for each estimate two calculations were performed with different values of maximum light use efficiency. In a second stage, GPP was analyzed for the entire Caatinga biome (2001 to 2016), establishing relationships with rainfall variability, soil types and land use and cover. The results showed that the MODIS-GPP algorithm presented a moderate performance ($r^2 = 0.505$, $p < 0.05$, $RMSE = 1.81 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), with an underestimation of GPP values during periods with higher rainfall occurrence and with overestimation during the dry season. The GPP estimate with local meteorological data did not improve the results ($r^2 = 0.31$, $p < 0.05$; $RMSE \text{ GPP}_{\text{otm_local1}} = 1.98 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $RMSE \text{ GPP}_{\text{otm_local2}} = 2.65 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). When the MO17 algorithm was calculated using the evaporative fraction, the results were better with the use of EVI ($r^2 = 0.83$, $p > 0.05$, $RMSE = 1.47 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) and with $fAPAR_{\text{mod15}}$ itself ($r^2 = 0.71$, $p < 0.05$, $RMSE \text{ GPP}_{\text{otm_fapar1}} = 2.077 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $RMSE \text{ GPP}_{\text{otm_fapar2}} = 1.36 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). In addition, the comparison with the monthly data presented better performance for all estimates. Regarding the spatial and temporal variation of GPP for all Caatinga biomes, there was a strong relationship with rainfall ($r^2 = 0.83$, for correlation with mean data). The GPP varied spatially-temporally according to a gradient of humidity and, in addition, the highest values were recorded in regions of higher altitude. When the GPP was analyzed from latitudinal and longitudinal transects, a greater influence of caatinga anthropization on the accumulated GPP was evidenced over the period 2001 to 2016, where the most fragmented areas and / or the presence of agriculture had lower accumulated values of GPP. Finally, precipitation was the main conditioner of the temporal variation of the caatinga GPP.

Keywords: Caatinga. Carbon. Environment. Primary production. Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Localização geográfica do sítio de caatinga preservada e da torre de fluxos de carbono, inserida em área experimental da Embrapa Semiárida, no município de Petrolina, Nordeste brasileiro. As siglas correspondem aos estados da região Nordeste do Brasil: MA- Maranhão, PI- Piauí, CE- Ceará, RN- Rio Grande do Norte, PB- Paraíba, PE- Pernambuco, AL- Alagoas, SE- Sergipe, BA- Bahia..... 33
- Figura 2 – Climatologia mensal da precipitação pluviométrica, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação global, referente aos dados da estação meteorológica de Bebedouro, município de Petrolina, Pernambuco. 34
- Figura 3 – Localização geográfica do bioma caatinga, que abrange uma área de aproximadamente 800 km². Estão inseridos neste bioma os estados do Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE), Bahia (BA) e Minas Gerais (MG). 35
- Figura 4 – Mapa de altimetria do bioma Caatinga..... 36
- Figura 5 – Variação da precipitação pluviométrica (a), temperatura do ar (b), umidade relativa do ar (c) e radiação global (d) para o período de 2011 a 2015 medidos da torre micrometeorológica em área de Caatinga da Embrapa Semiárido, no município de Petrolina, estado de Pernambuco. A precipitação corresponde ao acumulado de oito dias, enquanto a temperatura do ar e umidade relativa referem-se a média de oito dias da média diária e a radiação a média de oito dias da soma diária..... 49
- Figura 6 – Variação temporal do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), do Índice de Vegetação Melhorado (EVI) e da precipitação pluviométrica acumulada de oito dias da área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. As faixas de cor cinza representam a estação seca na região. 50
- Figura 7 – Variação temporal do Índice de Área Foliar (LAI), da Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FPAR) e da precipitação pluviométrica acumulada de oito dias da área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. As faixas de cor cinza representam a estação seca na região. 51
- Figura 8 – Variação temporal da produção primária bruta derivada do MODIS e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015..... 53

Figura 9 – Erro relativo da estimativa da produção primária bruta (GPP) derivada do MODIS em relação aos dados de GPP medidos pelo sistema de covariância de vórtices turbulentos em área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.	53
Figura 10 – Regressão linear entre a produção primária bruta derivada do produto MOD17A2H e medida pelo método de vórtices turbulentos para área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).	55
Figura 11 – Relação entre os resíduos padronizados e os valores de GPP previstos pela equação de regressão (a) e probabilidade normal dos valores previstos ordenados (b).	56
Figura 12 – Variação temporal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015. GPPec é a GPP derivada da torre; GPP_{otm_local1} é a estimada pelo algoritmo MOD17 usando dados meteorológicos medidos localmente, com ϵ_{max} de 1,239; e GPP_{otm_local2} também foi estimada da mesma forma que a anterior, com ϵ_{max} de 2,5.	59
Figura 13 – Variação temporal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015. GPPec é a GPP derivada da torre; GPP_{otm_evi1} é a estimada pelo algoritmo MOD17 modificado usando o EVI e a FE, com ϵ_{max} de 1,239; e GPP_{otm_evi2} também foi estimada da mesma forma que a anterior, com ϵ_{max} de 2,5.	60
Figura 14 – Variação temporal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015. GPPec é a GPP derivada da torre; GPP_{otm_fapar1} é a estimada pelo algoritmo MOD17 modificado usando o fAPAR e a FE, com ϵ_{max} de 1,239; e GPP_{otm_fapar2} também foi estimada da mesma forma que a anterior, com ϵ_{max} de 2,5.	61
Figura 15 – Regressão linear entre a produção primária bruta derivada do método de vórtices turbulentos com a GPP modificada (GPP_{otm_local} , GPP_{otm_evi} e GPP_{otm_fapar}) para área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).	63
Figura 16 – Variação mensal da produção primária bruta derivada do MODIS e pelo método de covariância de vórtices turbulentos e a diferença percentual, para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015.	65

Figura 17 – Regressão linear entre a produção primária bruta derivada do produto MOD17A2H e medida pelo método de vórtices turbulentos para área de caatinga preservada, em escala mensal, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).	66
Figura 18 – Relação entre os resíduos padronizados e os valores de GPP previstos pela equação de regressão (a) e probabilidade normal dos valores previstos ordenados (b).....	66
Figura 19 – Variação mensal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado usando dados meteorológicos locais, para área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.....	67
Figura 20 – Variação mensal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado usando dados de PAR local, EVI e fração evaporativa, para área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.	68
Figura 21 – Variação mensal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado usando dados de PAR local, fAPAR _{mod15} e fração evaporativa, para área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.	69
Figura 22 – Regressão linear entre a produção primária bruta mensal derivada do método de vórtices turbulentos com a GPP-MODIS modificada (GPP_{otm_local} , GPP_{otm_evi} e GPP_{otm_fapar}) para área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).	70
Figura 23 – Comparação entre a GPP-MODIS e GPP-Torre para os anos de 2011 a 2015, referente a área de caatinga preservada localizada no município de Petrolina, Pernambuco, Brasil.	71
Figura 24 – Comparação entre a GPP modificada e GPP torre em escala anual, para o período de 2011 a 2015, referente a área de caatinga preservada localizada no município de Petrolina, Pernambuco, Brasil.....	72
Figura 25 – GPP derivada do MODIS (a e d), GPP ajustada a partir de modelo de regressão (b e e) e diferença (c e f) entre ambas para os dias 113 de 2011 (a, b, c) e 297 de 2013 (d, e, f).....	73
Figura 26 – GPP derivada do MODIS (a e d), GPP ajustada a partir de modelo de regressão (b e e) e diferença (c e f) entre ambas para o mês de março de 2015 (a, b, c) e agosto de 2012 (d, e, f).	74
Figura 27 – Classificação do uso e cobertura da terra no bioma Caatinga, para os anos de 2001 e 2016, derivada do produto MCD12Q1 (versão 6) do sensor MODIS, com 500 metros de resolução espacial.....	75

Figura 28 – Variação espacial e interanual da precipitação pluviométrica para o bioma Caatinga, referente ao período de 2001 a 2016.	78
Figura 29 – Variação espacial e interanual da produção primária bruta (GPP) da vegetação de Caatinga, derivada do produto MOD17A2H, referente ao período de 2001 a 2016.	81
Figura 30 – Variação espacial e interanual da produção primária bruta (GPP) da vegetação de Caatinga, derivada do MOD17A2H ajustado pelo modelo de regressão, referente ao período de 2001 a 2016.	82
Figura 31 – Comportamento espacial da produção primária bruta (GPP) média do período de 2001 a 2016, para o bioma Caatinga e o desvio padrão da GPP.	83
Figura 32 – Comportamento espacial da precipitação pluviométrica média do período de 2001 a 2016, para o bioma Caatinga e o desvio padrão.	84
Figura 33 – Correlação entre a GPP e a precipitação pluviométrica média anual da Caatinga entre 2001 e 2016 e quantitativo anual da assimilação de carbono pela vegetação do bioma Caatinga para o mesmo período.	85
Figura 34 – Variação mensal da produção primária bruta (GPP) média de 1000 pontos gerados aleatoriamente na área de abrangência da caatinga, para o período de 2001 a 2016.	86
Figura 35 – Variação anual da produção primária bruta (GPP) média de 1000 pontos gerados aleatoriamente na área de abrangência da caatinga, para o período de 2001 a 2016.	86
Figura 36 – Produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga de 2001 a 2016 e transectos traçados nos sentidos latitudinal e longitudinal.	87
Figura 37 – Variação da produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga, entre os anos de 2001 e 2016, ao longo de transectos latitudinais (oeste-leste).	89
Figura 38 – Variação da produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga, entre os anos de 2001 e 2016, ao longo de transectos latitudinais (oeste-leste).	90
Figura 39 – Variação da produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga, entre os anos de 2001 e 2016, ao longo de seis transectos longitudinais (norte-sul).	92
Figura 40 – Variação interanual da produção primária bruta (GPP) média para as principais classes de solos presentes no bioma Caatinga, entre os anos de 2001 a 2016.	94
Figura 41 – Correlação entre aos valores médios da produção primária bruta e da precipitação pluviométrica, por classe de solo, para o período entre 2001 a 2016.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAR	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
BPLUT	Tabela de propriedades do bioma
DPV	Déficit de pressão de vapor
DW	Teste de Durbin-Watson
EC	<i>Eddy Covariance</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENOS	El Niño Oscilação Sul
EOS	<i>Earth Observing System</i>
ER	Erro relativo
ERM	Erro relativo médio
EVI	Índice de Vegetação Melhorado
fAPAR	Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida
FE	Fração evaporativa
GEE	Gases do efeito estufa
GPP	<i>Gross Primary Production</i>
GMAO	<i>Global Modeling and Assimilation Office</i>
GPP _{mod_local}	GPP estimada por meio de dados meteorológicos locais
GPP _{otm_evi}	GPP estimada com PAR medido localmente, fração evaporativa e fAPAR derivada no EVI
GPP _{otm_fapar}	GPP estimada com PAR medido localmente, fração evaporativa e fAPAR _{mod15}
GPP _{ec}	GPP medida pelo sistema de covariância de vórtices turbulentos (<i>Eddy covariance</i>)
GPP _{mod}	GPP estimada pelo algoritmo MOD17
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverso do Quadrado da Distância
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IV	Índice de vegetação
LAI	<i>Leaf area index</i> / Índice de área foliar
LUE	<i>Light Use Efficiency</i>

MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
NEB	Nordeste brasileiro
NEE	Troca líquida do ecossistema
NPP	<i>Net primary production</i>
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PROBIO	Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica
R_a	Respiração autotrófica
R_{eco}	Respiração do ecossistema
REQM	Raiz do erro quadrático médio
RG	Radiação global
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UMD	Universidade de Maryland
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VPM	Modelo de Fotossíntese da Vegetação
WGS	<i>World Geodetic System</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Hipóteses	21
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos específicos.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Mudanças climáticas e o sequestro de carbono	22
2.2	Produção primária	24
2.3	O bioma caatinga	25
2.4	O sensor MODIS	27
2.4.1	O produto de produção primária (MOD17).....	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Localização e caracterização da área de estudo	33
3.2	Coleta e processamento de dados derivados do sistema de vórtices turbulentos ...	36
3.3	Coleta e processamento de dados de satélite	38
3.3.1	Produto MOD15	39
3.3.2	Produto MOD17	39
3.3.3	Produto MOD09	42
3.3.4	Estimativa da GPP melhorada para Caatinga (GPP_{otm}).....	43
3.4	Validação dos dados de satélite	44
3.5	Dados meteorológicos e ambientais	46
3.6	Análise espacial da produção primária bruta	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	Avaliação da produção primária bruta derivada do MODIS e de vórtices turbulentos em área de Floresta Tropical sazonalmente seca de Caatinga	48

4.1.1	Caracterização climática do período de 2011 a 2015	48
4.1.2	Análise da fenologia da Caatinga por meio de índices de vegetação	50
4.1.3	Validação e variabilidade da GPP de 8 dias	52
4.1.4	Variabilidade mensal da GPP	64
4.1.5	Desempenho do modelo de ajuste da GPP para o bioma Caatinga	73
4.2	Influência de fatores ambientais e antrópicos na variabilidade espacial e temporal da produção primária da Floresta Tropical Sazonalmente Seca de Caatinga	75
4.2.1	Cobertura da terra	75
4.2.2	Variação interanual da precipitação pluviométrica da área de abrangência da Caatinga	77
4.2.3	Variação espacial e temporal da produção primária bruta da Caatinga	80
4.2.4	Variação espacial da GPP acumulada pela Caatinga de 2001 a 2016 ao longo de transectos	87
4.2.5	Variação interanual da GPP por classe de solo	93
5	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) tem sido considerado o principal responsável pela elevação da temperatura média global, podendo provocar uma futura mudança no clima (IPCC, 2014; MARENGO et al., 2012). Koehler et al. (2002) descrevem as maiores fontes antrópicas de GEE, especialmente de dióxido de carbono (CO_2), como sendo a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, as queimadas, a pecuária extensiva, dentre outros. Tais atividades são bastante comuns em diversas áreas do Brasil, comprometendo a disponibilidade dos recursos naturais do país e contribuindo com as emissões de gases para atmosfera. Sendo assim, reduzir a concentração desses gases na atmosfera consiste no maior desafio para os países, sendo possível alcançá-lo por meio da melhoria da eficiência energética, produção em larga escala de biocombustíveis e pelo aumento do potencial de sequestro de carbono (SHAEFFER et al., 2006).

As florestas são um importante componente ecológico da biosfera, tendo um papel na redução dos níveis de CO_2 atmosférico, além de prover habitats para comunidades de animais, regulação de processos hidrológicos e proteção do solo (LIU; LIN; SU, 2017). Contudo, muitas dessas áreas no planeta têm enfrentado processos de degradação, sobretudo em decorrência da conversão do uso do solo em áreas agrícolas e de pastagens, o que contribui para o aumento das emissões de CO_2 . No Brasil, por exemplo, as emissões de GEE oriundas do setor agropecuário e das mudanças no uso da terra e florestas representam, respectivamente, 33% e 18% do total emitido (MCTI, 2016). Diante desse contexto, o bioma Caatinga merece destaque no cenário nacional por ter apresentado, ao longo dos últimos anos, uma redução gradativa de sua cobertura vegetal (MAPBIOMAS, 2018) e por ser um dos mais vulneráveis às mudanças climáticas (MARENGO et al., 2012). Isto pode comprometer ainda mais o funcionamento do ecossistema e a disponibilidade de recursos naturais para a população local.

Nesse contexto, entender a dinâmica dos fluxos de carbono entre a vegetação e atmosfera, nessa região, é de grande importância. As trocas de CO_2 entre esses dois sistemas é regulada por dois processos independentes: a produção primária bruta (GPP, em inglês) e a respiração (KIRSCHBAUM et al., 2001). A GPP consiste na quantidade de carbono capturado da atmosfera pelas plantas durante o processo de fotossíntese por unidade de área e de tempo, sendo um parâmetro essencial para caracterizar os processos de um ecossistema (SHI et al., 2017; ZHANG et al., 2012; HUTLEY et al., 2005; CHAPIN et al., 2006). O comportamento da GPP depende da variabilidade climática, histórico de perturbações, disponibilidade de água e

nutrientes, tipo de solo, composição de espécies e estrutura da comunidade (SHAEFER et al., 2012).

Ao longo dos últimos anos, vários métodos têm sido aplicados para estimar as trocas de carbono entre a superfície e a atmosfera, dentre os quais se destaca o método da covariância de vórtices turbulentos (BALDOCHI, 2003). Este método é bem estabelecido para medir diretamente a fluxo líquido do ecossistema (NEE) ao longo do tempo e em nível de parcela (BALDOCCHI, 2003). As lacunas nas séries temporais de NEE são inevitáveis devido as restrições micrometeorológicas e, por isso, vários métodos foram desenvolvidos para preencher essas lacunas, sendo que muitos deles também decompõem NEE em GPP e Respiração do ecossistema (Reco) (FALGE et al., 2001). Com o avanço das geotecnologias, nos últimos anos a técnica de vórtices turbulentos tem sido utilizada para validar produtos de sensoriamento remoto, que tem como vantagens sua aplicabilidade em escala regional, o baixo custo e por não ser um método destrutivo.

O *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) realiza observações de toda superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, adquirindo dados em 36 bandas espectrais com resolução espacial variando de 250 m a 1 km. Além disso, alguns produtos disponibilizados permitem o monitoramento dos recursos naturais de todo planeta, como por exemplo o produto MOD17. Este produto se refere a GPP e fotossíntese líquida estimadas para diferentes coberturas da terra em todo planeta. O algoritmo GPP-MODIS é baseado no conceito de eficiência do uso da luz de Monteith (1972), e sua estimativa depende de produtos de sensoriamento remoto e dados meteorológicos diários oriundos do *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO). O algoritmo MOD17 possui algumas incertezas em seus parâmetros de entrada e, por isso, diversos estudos têm sido desenvolvidos no mundo, buscando avaliar sua precisão e potencialidade. Estudos foram aplicados em vários sítios nos Estados Unidos (ZHANG et al., 2012), em área de floresta decídua na Coreia do Sul (SHIM et al., 2014), em múltiplos biomas dos Estados Unidos (TURNER et al., 2006) e em savanas na Austrália (KANNIAH et al., 2009). Outros estudos procuraram avaliar a produção primária dos ecossistemas terrestres em escala regional e global por meio do produto MOD17 (KANNIAH et al., 2011; GARCÍA et al., 2017; GILABERT et al., 2015; ZHANG et al., 2014; TAGESSON et al., 2017).

A avaliação dos produtos MODIS torna-se essencial para o monitoramento das trocas de carbono no semiárido brasileiro. Há poucas torres de fluxos de carbono na região e, além disso, não foram encontradas pesquisas que analisem a precisão dos produtos MODIS GPP para a vegetação de Caatinga. Ademais, diante das projeções de elevação da temperatura e redução

da precipitação no semiárido nordestino, é necessário entender as respostas da produção primária da vegetação de caatinga frente à variabilidade climática, identificando áreas mais vulneráveis à ocorrência de períodos prolongados de secas.

1.1 Hipóteses

O presente estudo tem como hipóteses (1) que há uma tendência de redução da produção primária bruta das áreas de caatinga, ao longo do tempo, e (2) que os valores de produção primária bruta serão mais elevados nas áreas mais preservadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- Analisar a variação espacial e temporal da produção primária bruta em áreas do bioma Caatinga.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar a produção primária bruta das áreas de caatinga utilizando técnicas de sensoriamento remoto;
- Validar os dados obtidos por sensoriamento remoto por meio de dados medidos em torre micrometeorológica;
- Avaliar a variabilidade e a tendência da produção primária bruta pela caatinga;
- Identificar os principais fatores – ambientais e antrópicos – que contribuem para variação espacial e temporal da produção primária bruta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mudanças climáticas e o sequestro de carbono

Ao longo das últimas décadas tem aumentado o debate a respeito do aquecimento do planeta e seus possíveis impactos sobre os recursos naturais e à sociedade. Vários estudos têm projetado um aquecimento na temperatura média da Terra e apontam como principal causa as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (GEE), sendo os principais o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2014; MARENGO et al., 2012). A concentração atmosférica desses gases tem aumentado a níveis sem precedentes nos últimos 800 anos. A concentração de CO₂, por exemplo, aumentou cerca de 40% desde o período pré-industrial, sobretudo devido às emissões provocadas pelo uso de combustíveis fósseis e pela conversão do uso da terra (IPCC, 2014).

No Brasil, as maiores fontes de emissão de GEE são oriundas do setor energético e a da agropecuária, representando, respectivamente, 37% e 33% do total de emissões. Por outro lado, as emissões provocadas pelas mudanças no uso da terra e florestas vem diminuindo nos últimos anos, mas ainda correspondem a 18% do total emitido, com destaque para o bioma Cerrado e Mata Atlântica (MCTI, 2016).

Diante deste cenário de aumento das emissões de GEE, vários impactos têm sido projetados em caso de aumento da temperatura média do planeta (IPCC, 2014; MARENGO; ESPINOZA, 2016). Tais impactos atingirão, sobretudo, as populações mais vulneráveis, como é o caso de países subdesenvolvidos com baixo potencial tecnológico para se adaptar aos impactos das mudanças do clima. Além disso, projeções indicam que uma elevação da temperatura e uma mudança nos padrões de precipitação influenciarão significativamente a distribuição, fenologia e o crescimento da vegetação, representando uma grande ameaça para algumas espécies mais sensíveis as alterações do clima (GANG et al., 2013; GANG et al., 2017).

As consequências de uma mudança no clima do planeta levaram a discussões no âmbito da comunidade científica, dos órgãos governamentais e da sociedade civil, em busca de alternativas e elaboração de estratégias para conter o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera. Dentre as alternativas para mitigação da concentração de GEE na atmosfera se destacam a melhoria da eficiência energética e a produção em larga escala de biocombustíveis - reduzindo o uso de combustíveis fósseis como fonte principal de energia -, e o reflorestamento de áreas degradadas, visando aumentar o potencial de sequestro de carbono

(SHAEFFER et al., 2006). Este último é definido como o processo segundo o qual o carbono é removido da atmosfera e incorporado temporariamente em um reservatório, como a biomassa vegetal (SALVADOR et al., 2017; SILVA, 2012).

O conceito de sequestro de carbono foi consagrado na Conferência das Partes de 1997, na cidade de Quioto, Japão, quando foi elaborado um protocolo de intenções e metas para redução das emissões de GEE, por parte dos países industrializados. Também se estabeleceu três mecanismos de flexibilização para se atingir as metas de redução das emissões, com destaque para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Nesse sentido, o sequestro de carbono está inserido no MDL, onde os países que não atingirem suas metas de redução podem financiar projetos em países em desenvolvimento de reflorestamento e conservação de florestas ou comprar créditos de carbono para compensar suas emissões (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2009).

As florestas são um importante componente ecológico na biosfera, tendo um papel na redução dos níveis de CO₂ atmosférico, além de prover *habitats* para comunidades de animais, regulação de processos hidrológicos e proteção do solo (LIU; LIN; SU, 2017). Porém, muitas áreas de florestas no planeta têm enfrentado processos de degradação, sobretudo pela conversão do uso da terra. Por isso, o reflorestamento tem papel fundamental no aumento do estoque de carbono terrestre e na mitigação das concentrações de CO₂ na atmosfera.

Diante dessa problemática, algumas ações incentivadas por governos têm procurado evidenciar o papel do reflorestamento e da conservação de áreas florestadas na retirada de carbono da atmosfera. Na Austrália, por exemplo, políticas de reflorestamento foram sancionadas pelo governo como alternativa para aumentar o potencial de sequestro de carbono e, ao mesmo tempo, gerar créditos de carbono (HOBBS et al., 2016).

O Brasil, assumindo seu compromisso perante a Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, instituiu, em 2008, a Política Nacional sobre Mudança no Clima (PNMC), que visa, dentre outros objetivos, à consolidação e expansão das áreas legalmente protegidas e o incentivo aos reflorestamentos e à recomposição da cobertura vegetal em áreas degradadas. Além disso, tem-se como objetivo o fortalecimento das remoções antrópicas por sumidouros de GEE no território brasileiro. Outro compromisso assumido pelo Brasil foi a publicação de estimativas anuais de emissões de GEE, divididas por setores da economia.

2.2 Produção primária

As emissões antropogênicas de GEE têm alterado significativamente os ciclos biogeoquímicos, em especial o ciclo do carbono. Portanto, a compreensão da quantidade de dióxido de carbono atmosférico absorvido e liberado pelos ecossistemas terrestres é de grande relevância (BARFORD et al., 2001), pois possibilita entender como os ecossistemas estão se comportando diante das alterações nos padrões climáticos regionais e se estes estão atuando como sumidouros ou fontes de carbono.

Os ecossistemas terrestres absorvem aproximadamente 60 gigatoneladas (Gt) de carbono por ano, enquanto os organismos autotróficos e heterotróficos liberam praticamente a mesma quantidade de carbono (C) de volta à atmosfera (COOPS et al., 2007). Absorção e liberação de carbono pelas plantas são conduzidos por dois processos independentes: a produção primária bruta (GPP, em inglês) e a respiração (R). A GPP consiste no total de carbono fixado no processo de fotossíntese pelas plantas de um ecossistema por unidade de área e tempo. Sendo assim, a produção primária bruta é um dos parâmetros fundamentais do ciclo do carbono, pois está relacionada à transferência de carbono da atmosfera para os ecossistemas terrestres, sendo a principal entrada de C nesses ecossistemas (HUTLEY et al., 2005; CHAPIN et al., 2006). O comportamento da GPP depende da variabilidade climática, histórico de perturbações, disponibilidade de água e nutrientes, tipo de solo, composição de espécies e estrutura da comunidade vegetal (SCHAEFER et al., 2012). Em ambientes áridos e semiáridos a disponibilidade de água é um fator preponderante no controle das trocas de carbono.

Parte do carbono fixado durante a fotossíntese é perdido pelo metabolismo interno das plantas. Essa perda é denominada respiração autotrófica (R_a) e normalmente equivale a cerca de metade do carbono fixado pelas plantas (KIRSCHBAUM et al., 2001). Enquanto isso, a respiração heterotrófica (R_h) refere-se a perda de carbono por outros organismos que não sejam as plantas, tais como animais que vivem no subsolo e na camada de serapilheira, sendo responsáveis pela decomposição da matéria orgânica que atingiu o solo. Sendo assim, a soma de R_a e R_h corresponde a respiração do ecossistema (Reco).

No âmbito do debate da redução da concentração de GEE na atmosfera, a variável produção primária líquida (NPP, em inglês) assume papel fundamental na compreensão das trocas de carbono entre a superfície e a atmosfera, pois se refere ao carbono orgânico estocado pelas plantas, geralmente medida ao longo de um período de um ano ou mais. A NPP é obtida como a diferença entre a GPP e a respiração realizada pelos organismos autotróficos (R_a) (KIRSCHBAUM et al., 2001).

Diversos métodos têm sido empregados para estimar as trocas de carbono entre a superfície e a atmosfera, dentre os quais se destaca o método da covariância dos vórtices turbulentos (BALDOCHI, 2003). Este método é bem estabelecido para medir diretamente o fluxo de NEE ao longo do tempo e em nível de parcela (BALDOCCHI, 2003). As lacunas nas séries temporais de NEE são inevitáveis devido a restrições micrometeorológicas e, por isso, vários métodos foram desenvolvidos para preencher essas lacunas, além de também realizar a partição de NEE em GPP e Reco (FALGE et al., 2001).

O entendimento dos fluxos de carbono é essencial para projetar mudanças futuras da produtividade primária dos ecossistemas terrestres em resposta às mudanças climáticas. Nesse sentido, vários pesquisadores criaram uma rede de colaboração em todo planeta, chamada de FLUXNET, visando integrar seus dados e fornecer acesso aos membros da comunidade científica. O FLUXNET é uma rede global de sítios de torres que monitoram os fluxos de água, energia e carbono. Atualmente, há mais de 650 torres em operação, em cinco continentes e sua distribuição latitudinal varia de 70 graus norte a 30 graus sul. As torres utilizam um sistema de covariância de vórtices turbulentos, em que são gerados dados com frequência de 30 minutos.

2.3 O bioma caatinga

A Caatinga é um bioma heterogêneo constituído por um mosaico de arbustos e áreas de floresta sazonalmente seca (LEAL et al., 2005; SANTOS et al., 2011), abrangendo uma área de aproximadamente 800.000 km² (GARIGLIO et al., 2010; SANTOS et al., 2011). A cobertura vegetal apresenta uma variedade de fisionomias e de espécies xerófilas, cuja distribuição é condicionada por aspectos climáticos, edáficos, topográficos e antrópicos (ALVES; ARAÚJO; NASCIMENTO, 2009). Em áreas de relevo mais elevados, conhecidas como brejos de altitude, há enclaves de floresta perenifólia e sub-perenifólia (TABARELLI e SANTOS, 2004; RODAL et al., 2005; RODRIGUES et al., 2008).

De maneira geral, a caatinga encontra-se associada a um clima semiárido, com alta variabilidade espacial e temporal da precipitação. A escassez de chuvas associada a altas taxas de insolação e temperatura elevada impõem restrições hídricas ao desenvolvimento das espécies vegetais, de tal modo que as espécies de caatinga possuem diversas estratégias e adaptações para resistir aos períodos de seca prolongados. Trovão et al. (2007), destaca como estratégias o aprofundamento do sistema radicular, diminuição no tamanho da folha e perda da folhagem no período de déficit hídrico.

O entendimento dos padrões fenológicos da caatinga é essencial para compreender como a precipitação afeta a dinâmica da vegetação de caatinga e, conseqüentemente, o equilíbrio de todo ecossistema. Isso torna-se ainda mais relevante quando estudos indicam que o Nordeste brasileiro é uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas (MARENGO et al., 2012). Projeções apontam para possíveis aumentos de temperatura (entre 2 e 4° C) e uma redução de 10 a 40% da precipitação para a região (CIRILO, 2008; MARENGO et al., 2012; IPCC, 2014). Tais previsões têm potencial para afetar as funcionalidades de um ecossistema como a Caatinga, limitando o crescimento da vegetação, provocando a mortalidade de árvores e induzindo incêndios florestais (CHEN et al., 2013; HUANG et al., 2016).

Barbosa e Kumar (2016), examinaram os padrões espaciais e temporais da dinâmica da Caatinga e sua relação com a precipitação, utilizando um índice de vegetação. Os resultados mostram que as estações de crescimento e a dinâmica da caatinga são altamente dependentes das chuvas, e que a ocorrência de secas meteorológicas impacta negativamente as condições da cobertura vegetal. Silva-Pinheiro et al. (2016) também indicam a disponibilidade de água no solo como um fator crucial que impulsiona o crescimento e a sobrevivência das plantas no ambiente semiárido. A exposição ao estresse hídrico influencia na redução da condutância estomática (SCHAUCHTMAN e GOODGER, 2008), o que afeta negativamente as taxas líquidas de assimilação de CO₂ e, conseqüentemente, limita a produção de biomassa por planta (MAHAJAN e TUTEJA, 2005).

Além de suscetível as secas, a caatinga também enfrenta uma grande pressão antrópica, resultando em um processo de degradação dos recursos naturais existentes (RIBEIRO et al., 2016). Essa degradação é resultado, sobretudo, do manejo inadequado da terra, como a agricultura de corte e queima, o sobrepastoreio e a superexploração de recursos lenhosos como fonte de energia (MENEZES et al., 2012; VIEIRA et al., 2015; GIONGO et al., 2011). Sendo assim, mudanças no uso do solo podem influenciar na dinâmica dos ciclos de carbono e nitrogênio, fazendo com que o ecossistema atue como uma fonte de GEE devido à falta de vegetação nativa (FLEISCHER et al., 2016; MENEZES et al., 2012; WATANABE e ORTEGA, 2011).

As mudanças do uso e cobertura da terra no bioma Caatinga têm contribuído para o aumento da fragmentação (MIRANDA et al., 2017) e expansão do processo de desertificação (SOUZA et al., 2015). Tomasella et al. (2018) mapearam a ocorrência de solo exposto no nordeste brasileiro, utilizando imagens de satélite. Os resultados apontam um aumento das áreas degradadas ao longo do período de 2000 a 2016, e essa expansão foi acelerada devido à seca severa que afetou a região a partir de 2011. Souza et al. (2015) analisaram os efeitos da

desertificação na composição da vegetação de caatinga em três locais da zona semiárida brasileira e identificaram que a degradação da terra desencadeou mudanças generalizadas na diversidade, riqueza e composição florística do bioma Caatinga.

Ao longo dos últimos anos, alguns estudos têm procurado estimar o desmatamento da caatinga. A cobertura do bioma foi estimada, em 1984, em 68% de sua vegetação remanescente, sendo as áreas restantes consideradas como antropizadas (CONSELHO NACIONAL DA RESERVA DA BIOSFERA DA CAATINGA, 2004), ou seja, espaços ocupados pela agropecuária ou alterados pela ação humana. Em 2008, o PROBIO (Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica) mapeou o uso e cobertura da terra da Caatinga com base em imagens do satélite Landsat a partir de 2002. Este estudo verificou que os remanescentes de caatinga correspondiam a somente 43% da área total. Mais recentemente, Beuchle et al. (2015) avaliaram as mudanças na cobertura da terra no bioma Caatinga, entre 1990 e 2010, e identificaram um percentual de cobertura nativa de 63%. Além disso, os autores verificaram uma perda líquida total de árvores de 15.571 km² ao longo de duas décadas e concluíram que a Caatinga tem estado sob crescente pressão por muitos anos. O percentual de cobertura remanescente varia entre as pesquisas devido às diferenças metodológicas dos mapeamentos, contudo todas apontam para uma redução da caatinga ao longo das últimas décadas.

2.4 O sensor MODIS

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é o principal instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua, que fazem parte do sistema de observação da Terra da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O primeiro sensor do MODIS, que está acoplado ao satélite Terra (EOS AM-1) foi lançado com sucesso no dia 18 de dezembro de 1999, enquanto o segundo sensor, integrado ao satélite Aqua (EOS PM-1) foi lançado em 4 de maio de 2002. Estes sensores oferecem um olhar para fenômenos terrestres, atmosféricos e do oceano, beneficiando uma comunidade de usuários ampla e diversa em todo mundo (NASA, 2013).

O MODIS realiza observações de toda superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, adquire dados em 36 bandas espectrais que se situam entre 0,4 e 14,4 micrometros. Em duas dessas bandas, os dados coletados possuem resolução espacial de 250 metros, outras cinco bandas têm resolução de 500 m e as demais apresentam resolução espacial de 1 quilômetro. Com essas bandas, são gerados produtos (Tabela 1), dentre os quais se destacam o MOD09 (refletância),

MOD11 (temperatura da superfície e emissividades), MOD15 (índice de área foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida) e MOD17 (produção primária bruta e fotossíntese líquida) (USGS, 2017).

Tabela 1. Principais produtos do sensor MODIS com suas respectivas resoluções espacial e temporal.

Produto	Nome	Resolução	
		Espacial	Temporal
MOD09	Refletância superfície	1 km, 250 m e 500 m	1 e 8 dias
MOD10	Cobertura de neve e extensão de gelo na superfície do mar	500 m	5 min; 1 e 8 dias
MOD11	Temperatura da superfície da Terra e emissividade	1, 5, e 56 km	5 min; 1 e 8 dias
MOD29	Cobertura de neve e extensão de gelo na superfície do mar	1 e 28 km	5 min; 1 e 8 dias
MOD43	BRDF/albedo	1 km	16 dias
MOD13	Índices de Vegetação	1 e 28 km; 250 m e 500 m	16, 30 e 32 dias
MOD15	Índice de área foliar e FPAR	500 m, 1 e 56 km	8 e 32 dias
MOD16	Evapotranspiração	500 m	8, 30 e 365 dias
MOD17	Produção Primária e fotossíntese líquida	500 m, 1 e 56 km	8, 32 e 365 dias
MOD12	Cobertura da Terra e mudanças na cobertura da Terra	1 km	96 dias
MOD14	Anomalias termais, fogo e queima de biomassa	1 e 28 km	5 min; 1 e 8 dias
MOD44	Conversão da cobertura vegetal	1 km e 250 m	32 e 365 dias

Legenda: BRDF – Fator de Refletância Bidirecional; FPAR – Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida. Fonte: Latorre et al. (2003).

Os dados do sensor MODIS são divididos em cinco níveis (0 a 4), que variam de acordo com nível de processamento realizado. O nível 0 são os dados brutos sem qualquer tratamento e não estão disponíveis para o usuário em geral. O nível 1 corresponde aos produtos que contém as 36 bandas utilizadas como entrada para geolocalização, calibração e processamento. O nível 2 corresponde aos produtos derivados de radiâncias calibradas de produtos prévios MODIS. O nível 3 são produtos espacialmente reamostrados e compostos para um determinado tempo para produzir uma estimativa das variáveis geofísicas para cada grade de localização. E, por fim, no nível 4 os produtos são gerados pela incorporação dos dados MODIS em modelos para se estimar variáveis biofísicas (USGS, 2017; JUSTICE et al., 2002).

2.4.1 O produto de produção primária (MOD17)

Os produtos MOD17 contêm a produção primária bruta e a fotossíntese líquida em escala de oito dias e resolução espacial de 1 km (Coleção 5) e 500 metros (Coleção 6). Além disso, apresenta uma estimativa anual da produção primária líquida das diferentes coberturas vegetais do planeta. O algoritmo usado para estimar a GPP é baseado na relação linear entre a eficiência do uso da luz (LUE, em inglês) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (MOTHEITH, 1972), e utiliza três fontes de dados como entrada: produtos de sensoriamento remoto como a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR), dados meteorológicos globais gerados pelo DAO ou GMAO (Escritório de Assimilação de Dados) da NASA, e parâmetros biofísicos específicos para cada bioma.

O algoritmo MOD17 apresenta uma série de etapas, em que algumas são calculadas diariamente (e. g. GPP) e outras em escala anual (e. g. NPP). Além disso, com base no produto de cobertura da terra (MOD12), um conjunto de parâmetros específicos para cada bioma são extraídos da Tabela de Propriedades do Bioma (BPLUT). Eventualmente, os produtos MODIS passam por revisões no algoritmo de implementação, visando a melhoria dos resultados. Recentemente foi lançada uma nova versão do produto MOD17 (versão 6), com atualizações nos parâmetros específicos de cada bioma (presentes na BPLUT), nos dados meteorológicos diários do GMAO e na resolução espacial em que os dados são gerados, tendo agora 500 metros de resolução (RUNNING, 2015).

Alguns pressupostos e generalizações nas variáveis de entrada do algoritmo MOD17 geram incertezas acerca de sua influência no resultado final da GPP e NPP. Por exemplo, os parâmetros específicos para cada bioma, presentes na BPLUT, não variam no espaço e no tempo, nem apresentam valores diferentes para cada variação fisionômica de um mesmo bioma. Além disso, o algoritmo do MOD17 seleciona o valor máximo de fAPAR para um período de oito dias e, por isso, como a produção primária é calculada diariamente, assume-se que o LAI e o fAPAR não variam durante o período de oito dias (HEINSH et al., 2006)

Diante das incertezas nas múltiplas entradas do algoritmo MODIS GPP, é essencial a avaliação e validação de seus resultados. Desse modo, vários estudos têm sido desenvolvidos no mundo todo, buscando avaliar o potencial dos produtos MOD17. Turner et al. (2006) avaliaram os produtos de GPP e NPP para nove sítios em diferentes tipos de biomas e de uso da terra. Os autores compararam os produtos MODIS com dados gerados pelo projeto BigFoot, e constataram que o algoritmo NPP e GPP tende a superestimar os valores em áreas de baixa produtividade e, em contrapartida, subestimar em sítios com alta produtividade.

Zhang et al. (2012) avaliaram os padrões espaciais e temporais do MODIS GPP em 40 sítios localizados nos Estados Unidos, comparando-os com resultados de um modelo de processo do ecossistema e com medidas de vórtices turbulentos (*Eddy covariance*). Os resultados mostraram que a GPP do modelo baseado em processo apresentou desempenho melhor do que a GPP do MODIS se comparados com dados de vórtices. Além disso, também foi verificado que houve uma subestimativa do MODIS GPP em meses altamente produtivos e uma superestimativa em meses de baixa produtividade. Os autores sugerem que a falha do algoritmo MODIS para representar a variabilidade mensal e anual da GPP pode estar associada a inadequação dos modelos de LUE na captação das mudanças na fisiologia do dossel ao longo do tempo. As tendências no MODIS GPP em relação aos dados observados decorrem de uma falta de sensibilidade à densidade do dossel, que é espacialmente e temporalmente variável. Conseqüentemente, os dados do MODIS são inferiores aos observados durante a estação de crescimento porque a contribuição das folhas sombreadas para a fotossíntese do dossel está subrepresentada. Por outro lado, a GPP elevada durante a estação seca está associada à superestimação da contribuição das folhas sombreadas (SPRINTSIN et al., 2012).

Shim et al. (2014) avaliaram a GPP do MODIS em uma área de floresta decídua na Coreia do Sul, e encontraram uma boa correlação entre variabilidade mensal da GPP do MODIS e a medida por vórtices turbulentos durante a estação de crescimento, contudo houve uma sobrestimativa da GPP MODIS em torno de 15% a 34%. Os autores afirmaram que os erros nas estimativas da GPP pelo algoritmo MODIS estão associadas a questões aerodinâmicas e características hidrológicas, relacionadas a topografia montanhosa da área de estudo.

Dentre os estudos que procuraram avaliar as estimativas de produção primária do MODIS, pode-se destacar, ainda, aqueles que têm como foco biomas localizados em regiões secas, como as savanas. Este bioma cobre um sexto da superfície do planeta e são importantes em termos de sequestro e armazenamento de carbono (GRACE et al., 2006). Sjostrom et al. (2013) avaliaram o produto MOD17 usando dados meteorológicos e de vórtices turbulentos em 12 sítios localizados no continente africano, e verificaram que houve uma subestimativa nos locais secos do Sahel, sendo explicado em sua maioria pela fAPAR.

Sendo assim, Kanniah et al. (2009) analisaram as coleções 4.5, 4.8 e 5 do MODIS GPP a partir de medições de vórtices turbulentos, e buscaram verificar se as melhorias realizadas no algoritmo aumentou o desempenho do produto na determinação da variação sazonal da GPP para uma área de savana arborizada no norte da Austrália. Além disso, os autores avaliaram o desempenho do algoritmo MOD17 substituindo o déficit de pressão de vapor (DPV) por uma função de déficit hídrico do solo para os dados da estação seca. As coleções do MODIS

indicaram um aumento abrupto da GPP a partir da estação chuvosa, enquanto os dados medidos na torre não apresentaram esse padrão. Outro ponto verificado foi a subestimação dos dados de GPP-MODIS durante o período chuvoso, e o dato do algoritmo MOD17 não ter conseguido capturar bem a transição de uma estação para outra.

Kanniah et al. (2011) examinaram o papel dos fatores ambientais no controle da variação espacial da GPP em áreas de savana no norte da Austrália. Foi utilizado o produto de fAPAR (MOD15) para estimar a GPP. Os autores concluíram que a variabilidade espacial da GPP na região de savana está fortemente correlacionada com as chuvas, pois a precipitação influencia na estrutura, composição e função da vegetação, alterando o fAPAR e LUE que, de acordo com os autores, regulam a produtividade das savanas.

Tagesson et al. (2017) avaliaram a versão 6 do produto MODIS GPP com base em dados de vórtices turbulentos para seis sítios na região do Sahel africano. Os autores também estabeleceram relações entre a capacidade fotossintética e a eficiência quântica com índices de vegetação para modelagem da GPP. Os resultados mostraram uma forte correlação linear entre os dados do MODIS e da torre, contudo o algoritmo MOD17 subestimou a GPP nos sítios estudados, resultando em um alto erro quadrático médio (2,69 g C m² dia).

Gilbert et al. (2015) avaliaram as estimativas de GPP do MODIS em sete sítios em ecossistema mediterrâneo na Espanha para os anos de 2008 e 2011. Foi estabelecida uma otimização do algoritmo de estimativa da GPP por meio de ajustes nos parâmetros de entrada fAPAR, PAR e LUE. De acordo com os resultados encontrados, a correlação entre a GPP derivada do MODIS e de vórtices turbulentos diminui à medida que a aridez aumenta, sendo os melhores resultados encontrados nos locais onde a precipitação anual é superior a 700 mm. Quanto ao modelo otimizado, notou-se uma correlação mais forte em todos os sítios estudados, que pode ser explicada pela inserção de uma variável que evidencia melhor os efeitos do déficit hídrico na assimilação de carbono em regiões secas.

Álvarez-Taboada et al. (2015) também compararam o produto MODIS GPP com dados de torre de vórtices turbulentos em seis locais diferentes distribuídos em regiões temperadas e secas. Os resultados indicaram que o MODIS GPP é altamente correlacionado com a GPPec, em escala anual, para pastagens e arbustos. Em locais com restrições hídricas permanentes, contudo, a correlação foi um pouco menor e o algoritmo MODIS tendeu a superestimar a GPP nesses ambientes. Além disso, a dinâmica sazonal e o início e o final da estação de crescimento não foram bem capturados pela GPP-MODIS nos locais em que a produtividade foi baixa ao longo do ano ou naqueles onde as mudanças nos fluxos foram abruptas, devido às restrições hídricas. Os autores concluíram afirmando que o estresse hídrico do solo deve ser adicionado

aos cálculos do algoritmo MOD17 para áreas secas, e que as estimativas de GPP 8-dias podem ser melhoradas, em ambientes não florestados secos, com a inclusão de dados meteorológicos em uma resolução espacial mais fina. Ma et al. (2014) buscaram elaborar um método simples e robusto para estimar com precisão a GPP de savana a partir de medidas de torre de fluxo de vórtices turbulentos para escalas regionais utilizando observações de sensoriamento remoto.

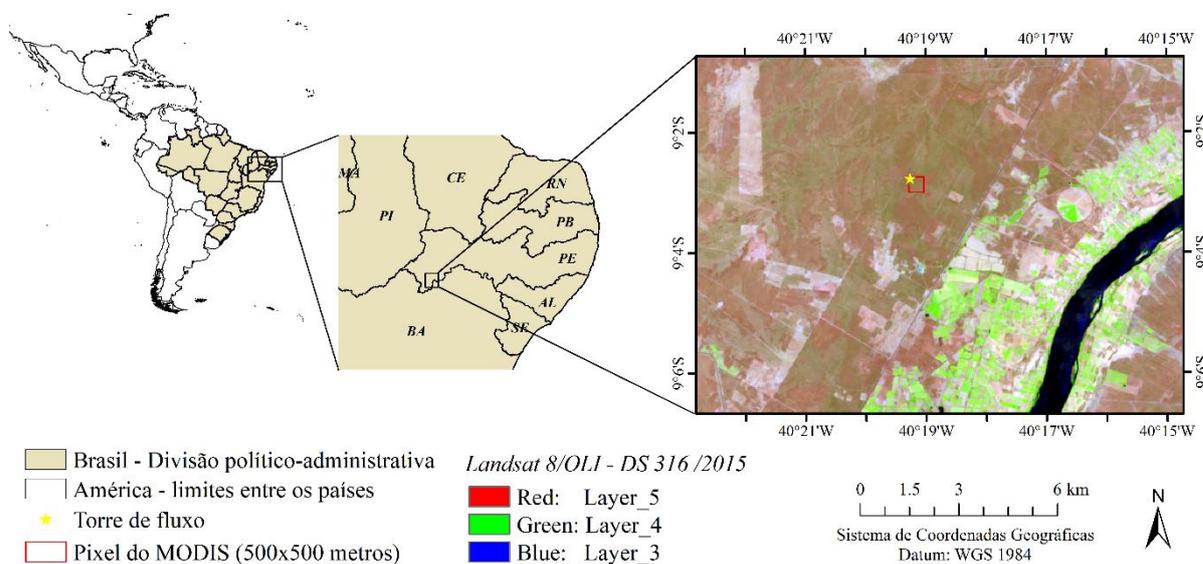
No Brasil, ainda são poucos os estudos que utilizam os produtos MODIS GPP e NPP. Silva et al. (2013) estimaram a produção primária bruta em uma área de agricultura irrigada, no estado da Paraíba, utilizando imagens Landsat, e compararam os resultados com dados do produto MOD17. Sendo assim, os autores verificaram que as diferenças entre a GPP dos dois sensores foram baixas (11,7%). Teixeira (2013) analisou a produção de biomassa em área irrigada e de caatinga utilizando imagens MODIS, para os municípios de Petrolina e Juazeiro – BA. Estes estudos utilizaram imagens do sensor MODIS para analisar o comportamento da produção primária da caatinga, mas ainda há uma carência de estudos que avaliem o potencial do produto MOD17 para estimar com precisão a produção primária da vegetação de caatinga.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

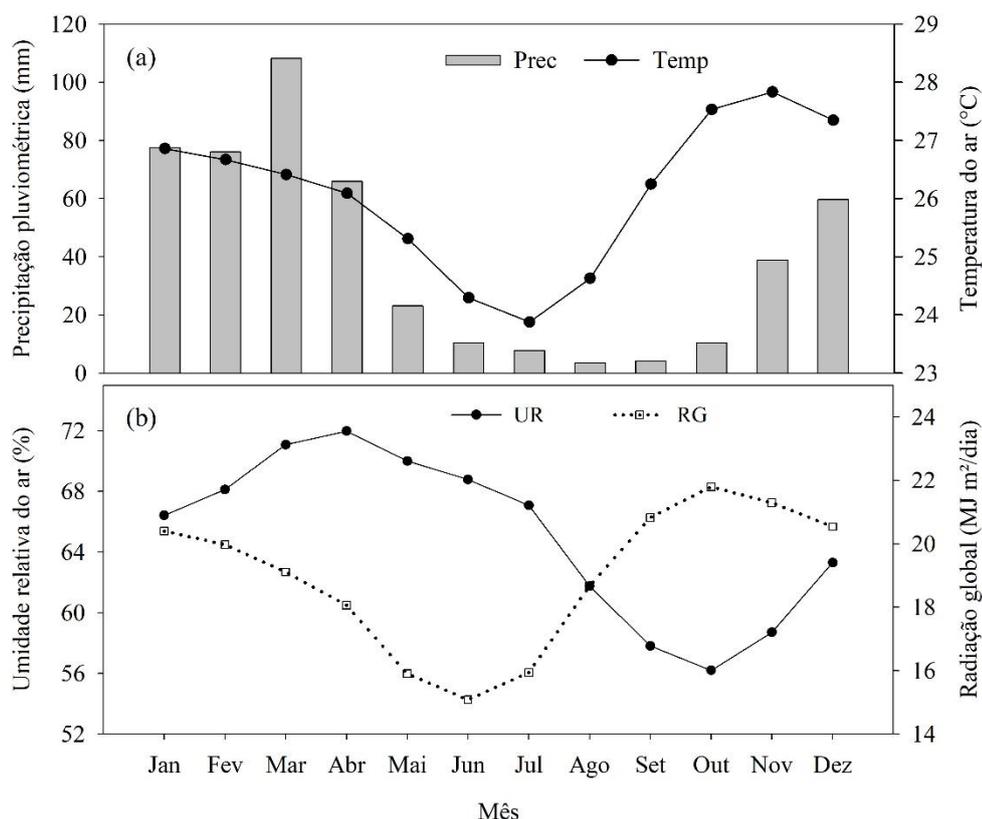
A primeira etapa do presente estudo foi conduzida em uma área de Floresta Tropical sazonalmente seca de Caatinga, com vegetação preservada por cerca de 40 anos (SOUZA et al., 2015; KILL, 2017), localizada na unidade semiárido da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), no município de Petrolina, estado de Pernambuco (Figura 1). Na área encontra-se instalada uma torre micrometeorológica para o monitoramento dos fluxos de energia, água e carbono.

Figura 1- Localização geográfica do sítio de caatinga preservada e da torre de fluxos de carbono, inserida em área experimental da Embrapa Semiárida, no município de Petrolina, Nordeste brasileiro. As siglas correspondem aos estados da região Nordeste do Brasil: MA- Maranhão, PI- Piauí, CE- Ceará, RN- Rio Grande do Norte, PB- Paraíba, PE- Pernambuco, AL- Alagoas, SE- Sergipe, BA- Bahia.



O clima é classificado como BSh, ou seja, tropical semiárido onde a precipitação geralmente é inferior a 800 mm (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de 510 mm, com estação chuvosa entres os meses de novembro e abril, que concentra 90% do total de chuva anuais; enquanto a temperatura média é de 26,2 °C, com pouca variação ao longo do ano (SOUZA et al., 2015). A umidade relativa do ar média apresenta comportamento influenciado pela sazonalidade da precipitação, com valores mais elevados nos meses de abril e março (71,1 e 72%, respectivamente), e a radiação global assume oscila de 15,1 MJ m⁻² dia⁻¹ em junho a 21,8 MJ m⁻² dia⁻¹ em outubro (Figura 2b).

Figura 2- Climatologia mensal da precipitação pluviométrica, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação global, referente aos dados da estação meteorológica de Bebedouro, município de Petrolina, Pernambuco.

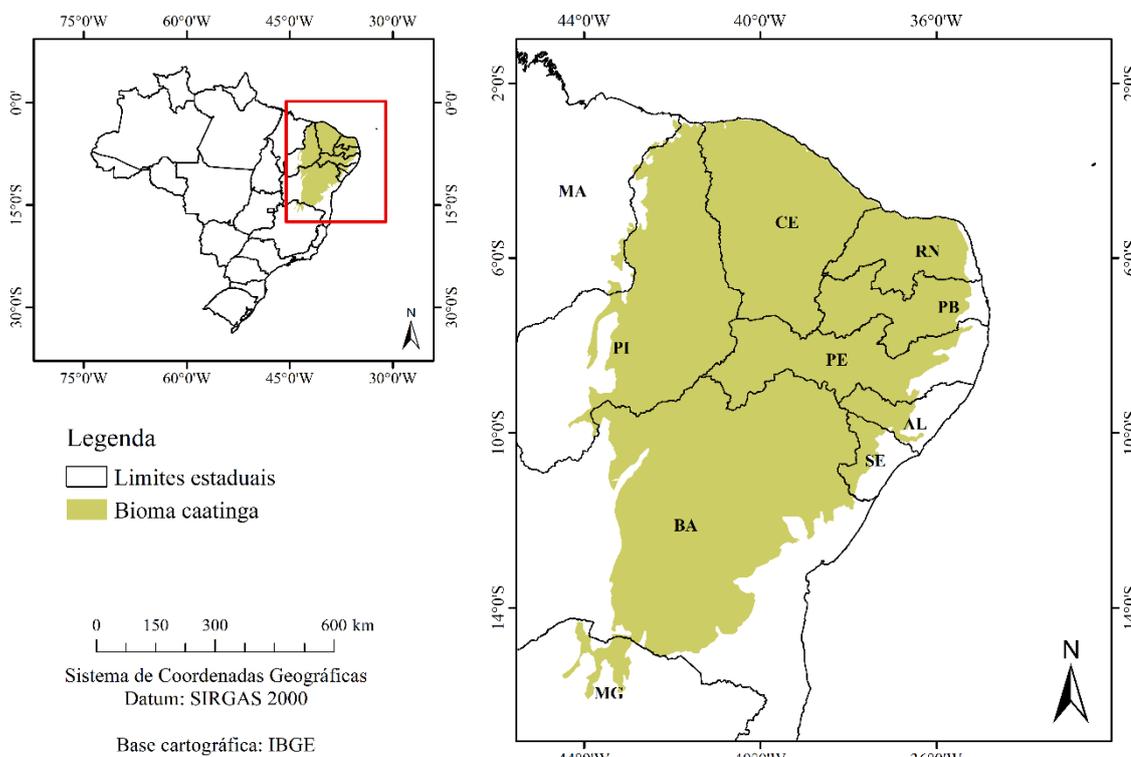


Diante das condições climáticas, a área apresenta vegetação do tipo caatinga hiperxerófila com porte arbóreo-arbustivo (KILL, 2017). As espécies vegetais encontram-se adaptadas às condições extremas de seca, perdendo suas folhas durante o período seco e recuperando-as poucos dias após a ocorrência das primeiras chuvas (SABINO; CUNHA; SANTANA, 2016). A distribuição das chuvas ao longo do ano influencia na própria distribuição das espécies da área. De acordo com Kill (2017), em toda área preservada há uma predominância de espécies herbáceas (44,4%), seguidas de arbóreas (20,4%) e arbustivas (17,6%). De acordo com o produto de cobertura da Terra (MOD12), classificação da Universidade de Maryland (UMD), o sítio onde está localizada a torre apresenta uma cobertura do tipo campos fechados (ou arbustos fechados) e, em alguns pixels do entorno, a cobertura foi classificada como Pradaria/Pastagem.

Em uma segunda etapa, a área de estudo foi ampliada e compreende a área de Floresta Tropical Sazonalmente Seca de Caatinga delimitada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que abrange os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais (Figura 3). Nesta área vivem

cerca de 27 milhões de habitantes, correspondendo a aproximadamente 14% da população brasileira (SANTOS et al., 2014), sendo a região semiárida mais populosa do planeta (HAUFF, 2010).

Figura 3- Localização geográfica do bioma caatinga, que abrange uma área de aproximadamente 800 km². Estão inseridos neste bioma os estados do Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE), Bahia (BA) e Minas Gerais (MG).

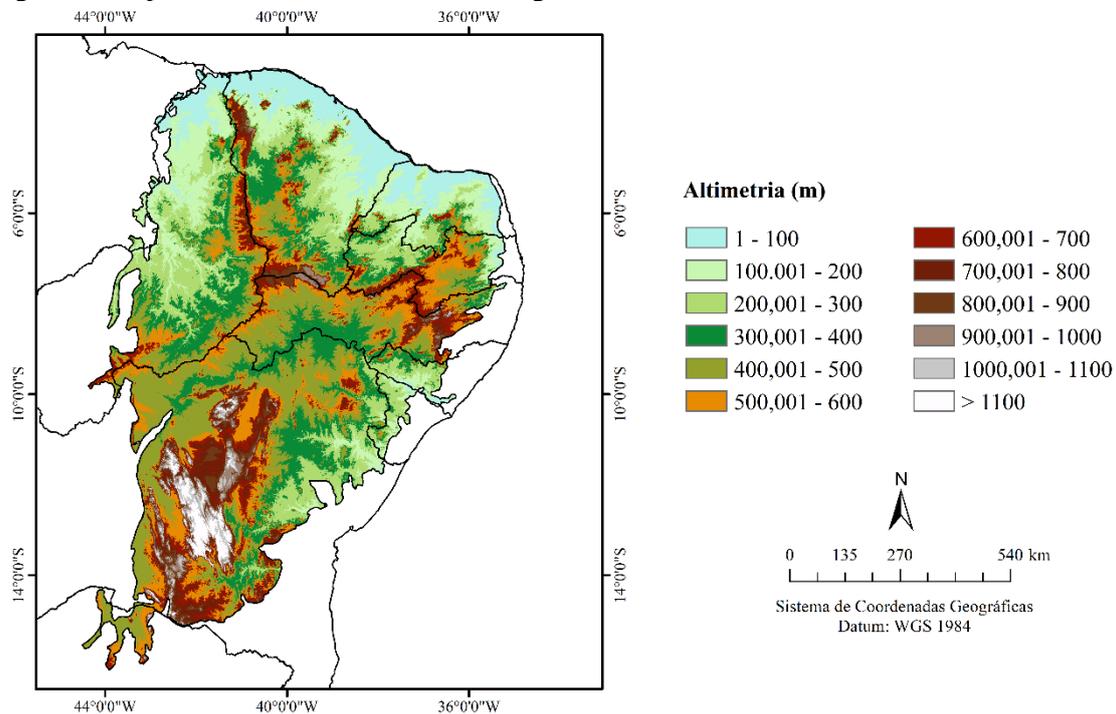


O domínio da Caatinga ocupa uma área que coincide principalmente com a região do semiárido brasileiro, que é descrita como a região com maior biodiversidade do mundo (MMA, 2011). Esta região apresenta precipitação extremamente irregular, tanto na distribuição temporal como espacial, e geralmente mais de 75% da precipitação anual ocorrem em três ou quatro meses (PRADO, 2003). A precipitação varia de 240 a 1500 milímetros anuais, mas a maior parte da região recebe menos de 750 mm/ano (LEAL et al., 2005; PRADO, 2003). Devido a essas características, a vegetação de caatinga apresenta diversas adaptações fisiológicas e um comportamento fenológico variável em função dos períodos de estiagem, que podem variar de 7 a 8 meses em anos normais a períodos com secas prolongadas por mais de um ano (BARBOSA e KUMAR, 2016).

A Figura 4 traz o mapa de altimetria para o bioma Caatinga, derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM. O relevo varia desde altitude mais baixas, na região litorânea

dos estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, até áreas mais elevadas nos principais Planaltos e Serras presentes no bioma.

Figura 4- Mapa de altimetria do bioma Caatinga.



Altitudes acima de 600 m são verificadas na faixa leste da Caatinga, entre os estados do Rio Grande do Norte e Alagoas, associados ao Planalto da Borborema. Além disso, tem a região da Chapada da Ibiapaba (entre o Piauí e o Ceará), Chapada do Araripe (Ceará, Pernambuco e Piauí), Chapada da Diamantina (Bahia) e as Serras do Espinhaço (Bahia e Minas Gerais). Nessas áreas há uma diferenciação quanto ao clima e ao tipo de fisionomia da vegetação, podendo ocorrer enclaves de florestas perenifólias ou subperenifólias, além de áreas de Cerrado (SOUZA; OLIVEIRA, 2006).

3.2 Coleta e processamento de dados derivados do sistema de vórtices turbulentos

O sistema de vórtices turbulentos encontra-se instalado a uma altura de 16,9 m acima do solo e 11,9 m da vegetação, orientado na direção predominante do vento (sudoeste) (SOUZA et al., 2015). O sistema é composto de um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific, Logan, UT, EUA) e um analisador de gás infravermelho de caminho aberto (LI-7500, Licor, Lincoln, NE, EUA). O Fluxo líquido do ecossistema (NEE) foi calculado para a média de 30 minutos por meio do *software* Altddy, versão 3.6.

A GPP e a respiração do ecossistema são medidas indiretamente a partir do particionamento do fluxo de NEE (Equação 10), de acordo com Reichstein et al. (2005). O processamento da partição dos fluxos foi realizado por meio da ferramenta *ReddyProc* (www.bgc-jena.mpg.de/bgi). Para o processamento, foi necessário inserir uma planilha com os dados de fluxos de CO₂, fluxo de calor latente e sensível, Temperatura do ar e do solo, radiação global, umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade de fricção. Todos esses dados foram medidos na mesma torre onde está inserido o sistema de vórtices turbulentos e adquiridos para o período de 2011 a 2015.

$$NEE = GPP - R_{eco} \quad (10)$$

onde NEE é o fluxo de carbono líquido ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), GPP é a produção primária bruta ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) e R_{eco} é a respiração do ecossistema ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

No método dos vórtices turbulentos, o NEE medido durante o período noturno pode ser considerado como a respiração do ecossistema, desde que a velocidade de fricção seja superior a 0,25 m s⁻¹, pois a fotossíntese, nesse período, é nula (BALDOCHI et al., 2002). Nos dias em que a velocidade de fricção apresentou valores inferiores a 0,25 m s⁻¹, a respiração noturna e a diurna foram estimadas utilizando o modelo proposto por Lloyd e Taylor (1994), que tem como base a dependência da respiração com a temperatura, de acordo com a Equação 11:

$$R_{eco} = R_{ref} E^{E_0(1/(T_{ref}-T_0)-1/(T-T_0))} \quad (11)$$

onde R_{eco} é a respiração do ecossistema, T_{ref} é a temperatura de referência, T_{soil} é a temperatura do solo à profundidade de 5 cm e T_0 é constante igual a 46,02 °C, conforme Lloyd e Taylor (1994).

No particionamento dos fluxos constatou-se que alguns valores de GPP eram negativos, sobretudo no período seco. Segundo Desai et al. (2008), dados negativos de GPP podem ser resultado de falhas no particionamento padronizado do NEE, cujos valores reais de GPP sejam próximos a zero. Sendo assim, os dados foram interpretados como falhas da estimativa e foram definidos como zero ou excluídos da série de dados, conforme Álvares-Taboada et al. (2015).

3.3 Coleta e processamento de dados de satélite

Foram utilizados produtos do sensor MODIS, correspondentes ao produto MOD15 (índice de área foliar e fAPAR), MOD17 (produção primária bruta) e MOD09 (refletância da superfície), acoplado ao satélite Terra, para o período de 01/01/2011 a 31/12/2015. Os dados do MODIS foram adquiridos na página eletrônica do *earthdata*, referentes as quadrículas (*tiles*) h14v9, h14v10, h13v9 e h13v10. Posteriormente, os produtos foram mosaicados e reprojados (coordenadas geográficas – latitude/longitude e datum WGS 1984) utilizando o *software Modis Reproject Tools* para gerar um *script*, que permitiu o processamento simultâneo das imagens para o período de análise. Cada mosaico foi submetido a uma transformação dos números digitais da imagem em valores reais correspondentes a cada variável, através de um fator de multiplicação (Quadro 1) (USGS, 2017). As análises foram realizadas para o *pixel* onde está inserida a torre com o sistema de vórtices turbulentos, pois o *pixel* estava inserido totalmente na área correspondente a caatinga preservada.

Quadro 1- Produtos do sensor MODIS e suas respectivas unidades de medida, tipos dos dados (resolução radiométrica) e seus fatores de multiplicação.

Produto	Unidades/Tipo do dado	Fator de multiplicação
MOD09A1 – Refletância da superfície	N.A. / 16 bits	0,0001
MOD15A2H – Índice de área foliar	m ² /m ² / 8 bits	0,1
MOD15A2H - fAPAR	Percentual / 8 bits	0,01
MOD17A2H – Produção primária bruta	g C m ² / 16 bits	0,1

Legenda: N.A. – Sem unidade de medida; m²/m² - metro quadrado de planta por metro quadrado de solo; g C m² - gramas de carbono por metro quadrado.

Na segunda etapa do estudo, foi utilizado apenas o produto MOD17A2H, referentes ao período de 2001 a 2016. As mesmas quadrículas já citadas foram usadas para análise da GPP para o bioma Caatinga. As imagens foram submetidas a um processamento para obtenção dos valores mensais e anuais de GPP, sendo realizado no *software* Erdas Imagine 9.1.

3.3.1 Produto MOD15

O produto MOD15 possui seis camadas, sendo elas o Índice de Área Foliar (LAI), a Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa (400 a 700 nm) Absorvida (fAPAR), controle de qualidade LAI/fAPAR e uma banda extra de qualidade, desvio padrão do LAI e do fAPAR. O algoritmo MOD15 utiliza valores das refletâncias da superfície diária (MOD09) e dados de um modelo de transferência radiativa, que é armazenado em uma tabela de consulta – *Lookup Table* (LUT) com duas dimensões (WENZE YANG et al., 2006). Quando esse método falha ou não encontra um valor satisfatório, um algoritmo secundário é utilizado, sendo este com base na relação entre o NDVI e o LAI/fAPAR, e variam para cada bioma (KNYAZIKHIN et al., 1998). O cálculo da fAPAR utiliza uma abordagem simples baseada na Lei de Beer, permitindo que o mesmo seja calculado em função do LAI e do coeficiente de extinção de luz do dossel, conforme equação 1.

$$fAPAR = 0,95 (1 - e^{-kLAI}) \quad (1)$$

em que o coeficiente de extinção de luz (k) é igual a 0,5.

O LAI e fAPAR são fornecidos em resolução temporal de 8 dias e espacial de 500 metros, contudo apresenta o valor máximo para cada período. Apesar de utilizar o valor máximo de 8 dias, ainda há contaminação de alguns *pixels* para determinados períodos (MYNEMI et al., 2002). Nesses casos, LAI/fAPAR tende a ser subestimado devido aos efeitos das nuvens, e isso irá subsequentemente introduzir um erro considerável na GPP. Por isso, a banda de qualidade do pixel LAI/fAPAR foi utilizada para filtrar os dados de GPP que estivessem contaminados pela presença de nuvens, combinado com o uso do algoritmo secundário.

3.3.2 Produto MOD17

O MOD17 contém três camadas, correspondendo a produção primária bruta (GPP), a fotossíntese líquida (PSnet) e a qualidade do *pixel* da PSnet, sendo utilizada a versão 6 do produto (mais atual) com resolução espacial de 500 metros. A GPP é calculada em escala diária, contudo os produtos são disponibilizados com a soma para o período de 8 dias e nomeadas pelo primeiro dia dentro do período de oito dias. Nesse estudo, para se obter a GPP diária, cada

imagem foi dividida por oito para os primeiros 45 valores/ano e por cinco (ou seis para anos bissextos) para o período final, conforme Running e Zhao (2015).

A GPP derivada do algoritmo MOD17 (GPP_{mod}) é baseada na relação linear entre a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e a eficiência do uso da luz – LUE (MONTEITH, 1972), sendo obtida de acordo com a Equação 2.

$$GPP = \varepsilon \times APAR \quad (2)$$

em que ε é a eficiência do uso da luz (LUE) e APAR a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, sendo calculados, respectivamente, a partir das equações 3 e 6.

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \times TMIN_scalar \times VPD_scalar \quad (3)$$

em que ε_{max} é a eficiência máxima de uso da luz, $TMIN_scalar$ é a fração mínima de temperatura e VPD_scalar é a fração de déficit de pressão de vapor. TMIN e VDP são multiplicadores que reduzem a eficiência máxima de conversão do uso da luz em condições de temperatura baixa e VPD elevado, inibindo, assim, a fotossíntese. Esses multiplicadores variam de zero a um, onde zero representa inibição total e um indica que não há inibição da fotossíntese. Os escalares são calculados da seguinte forma:

$$TMIN\ scalar = (TMIN - TMIN_{min}) / (TMIN_{max} - TMIN_{min}) \quad (4)$$

$$VPD\ scalar = (VPD_{max} - VPD) / (VPD_{max} - VPD_{min}) \quad (5)$$

em que TMIN é a temperatura mínima diária, $TMIN_{min}$ é a temperatura mínima em que a LUE é igual a zero, e $TMIN_{max}$ é o limite máximo de temperatura a partir do qual LUE é máximo, sob condição de temperatura ótima. VPD_{max} consiste no limite máximo onde LUE = 0, VPD_{min} é o limite mínimo onde LUE = ε_{max} e VPD é o déficit de pressão de vapor médio diário.

Os valores de ε_{max} , Tmin e VPDmin são extraídos da tabela de propriedades do bioma (BPLUT), que possui um conjunto de parâmetros para cada bioma presente na classificação de cobertura da terra da Universidade de Boston (UMD). Tais parâmetros não variam no espaço e no tempo, nem apresentam valores diferentes para cada variação fisionômica de um mesmo bioma (RUNNING e ZHAO, 2015). O Quadro 2 mostra os parâmetros utilizados pelo algoritmo MOD17 na estimativa da eficiência do uso da luz para os dois tipos de coberturas encontrados

na área de estudo. A área que se encontra a torre e boa parte do entorno é classificada como campos fechados (ou arbustos fechados), onde a ϵ_{\max} é mais elevada do que nas pradarias ou pastagens.

Quadro 2- Parâmetros utilizados na estimativa da eficiência do uso da luz referentes as coberturas da terra de Campos Fechados e Pradarias, de acordo com o algoritmo MOD17.

Parâmetros de estimativa da eficiência do uso da luz	Classes da cobertura da terra (MOD12)	
	Campos fechados	Pradarias/Pastagens
LUE _{max} (g C/m ² /d/MJ)	1,281	0,86
TMIN _{min} (°C)	-8,0	-8,0
TMIN _{max} (°C)	8,61	12,02
VPD _{min} (Pa)	650,0	650,0
VPD _{max} (Pa)	4700,0	5300,0

O cálculo da APAR utiliza dados meteorológicos de radiação fotossintenticamente ativa (PAR) incidente e fAPAR derivado do produto MOD15A2H. Os dados de PAR, temperatura do ar média e mínima e VPD, utilizados como entrada no algoritmo MOD17, são oriundos do GMAO/NASA, em uma resolução de 0,5° x 0,67° (latitude x longitude), em nível horário sendo transformados em diários.

$$APAR = PAR \times FPAR \quad (6)$$

em que PAR é a radiação fotossinteticamente ativa incidente, sendo obtida através da multiplicação da radiação de onda curta incidente sobre a superfície por 0,45, e fAPAR é a fração da APAR.

Os dados meteorológicos de PAR, temperatura do ar média e mínima e déficit de pressão de vapor utilizados como entrada no algoritmo MOD17 consistem em dados meteorológicos de reanálise. Tais informações são obtidas em nível horário e são transformados em diárias para entrada no algoritmo GPP-MODIS.

A avaliação da produção primária bruta foi realizada em escala de oito dias, mensal e anual. Os dados anuais foram calculados apenas para os anos que continham pelo menos 8 meses de dados, incluindo apenas o intervalo de 8 dias quanto tanto a GPP_{ec} como a GPP_{mod} estavam disponíveis e quando o ano não mostrava mais de 80% de dados perdidos. Além disso,

foram removidos alguns dados (GPP-8dias) de acordo com a banda de controle de qualidade do MODIS fAPAR.

3.3.3 Produto MOD09

Além dos produtos citados anteriormente, foram obtidos produtos de refletância da superfície derivado do MODIS, com resolução espacial de 500 m e temporal de 8 dias. O produto MOD009 apresenta a estimativa da refletância espectral da superfície para as bandas 1 a 7 do senso MODIS Terra, sendo corrigida para condições atmosféricas como gases, aerossóis e espalhamento de Rayleigh (VERMOTE, 2015). Para cada pixel da imagem, um valor é selecionado dentro das aquisições do período de 8 dias, de acordo com critérios como presença nuvens e o ângulo zenital.

As imagens de refletância foram adquiridas para o período de 2011 a 2015, sendo utilizadas para o cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI (ROUSE et al., 1974) e Índice de Vegetação Melhorado – EVI (HUETE et al., 1997), de acordo com as Equações 7 e 8:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} \quad (7)$$

em que ρ_{NIR} é a refletância na faixa do infravermelho próximo (banda 2) e ρ_{red} é refletância na faixa do vermelho (banda 1).

$$EVI = G \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L)} \quad (8)$$

em que ρ_{blue} é a refletância na banda do azul (banda 3). Os coeficientes C_1 e C_2 são utilizados para corrigir a influência da atmosfera, com valores de 6 e 7,5, respectivamente. O $L = 1$ corresponde ao ajuste de efeito do solo, enquanto $G = 2,5$ é um fator de ganho.

Esses índices de vegetação foram utilizados na análise da fenologia da vegetação de caatinga e na sua relação com a assimilação de carbono (GPP). Além disso, foram usados na análise de regressão como possibilidade de utilizá-los na estimativa mais precisa da GPP da caatinga.

3.3.4 Estimativa da GPP melhorada para Caatinga (GPP_{otm})

Neste estudo, também procurou-se estabelecer melhorias na estimativa da GPP processada por meio do algoritmo MOD17. Para tanto, foram realizadas três novas estimativas de GPP, utilizando dados medidos em torre micrometeorológica (2011 a 2015) e de sensoriamento remoto (Quadro 3). Na primeira estimativa, os dados meteorológicos utilizados no algoritmo MODIS-GPP foram substituídos por dados medidos na torre localizada em área de Caatinga, sendo eles a temperatura mínima e média do ar, déficit de pressão de vapor (DPV) e a radiação global (RG). Esses dados foram utilizados no cálculo dos reguladores da eficiência do uso da luz (LUE) e da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR), conforme as Equações 4 e 5.

A segunda estimativa utilizou a radiação global medida na torre (para o cálculo de PAR) e a fração evaporativa (FE) (Equação 7) como fator limitante da eficiência máxima do uso da luz, substituindo o déficit de pressão de vapor (DPV). E, por fim, a terceira estimativa difere da anterior apenas pelo uso do EVI na estimativa da fAPAR, como utilizado em outros estudos ao redor do planeta (XIAO et al., 2004a; XIAO et al., 2004b; XIAO et al., 2010; ZHANG et al., 2017).

Quadro 3- Resumo das variáveis utilizadas nos diferentes cálculos de produção primária bruta (GPP) realizadas neste estudo.

GPP (abreviatura)	Variáveis utilizadas na estimativa
GPP_{mod}	Produto do sensor MODIS.
GPP_{mod_local}	Estimativa da GPP conforme algoritmo MOD17, usando dados meteorológicos locais no cálculo de PAR, TMIN e VPDMIN.
GPP_{otm_fpar}	Estimativa melhorada da GPP, seguindo a mesma lógica do algoritmo MOD17, utilizando $FAPAR_{mod}$, dados meteorológicos locais no cálculo de PAR e substituição do DPV por FE.
GPP_{otm_evi}	Estimativa melhorada da GPP, seguindo a mesma lógica do algoritmo MOD17, utilizando EVI_{mod09} , dados meteorológicos locais no cálculo de PAR e substituição do DPV por FE.

A Fração Evaporativa, que substituiu o regulador VPD no cálculo de LUE, foi obtida com base dos fluxos de energia medidos em torre pelo sistema de vórtices turbulentos, conforme Equação 9:

$$FE = \frac{LE}{(LE+H)} \quad (9)$$

onde LE é o fluxo de calor latente e H é o fluxo de calor sensível, obtidos para cada 30 minutos e remostados para o dia, sendo, portanto, a FE foi calculada diariamente.

As estimativas de GPP otimizadas foram obtidas utilizando a mesma lógica do algoritmo MODIS-GPP (RUNNING e ZHAO, 2015). Sendo assim, a GPP foi calculada em escala diária e depois os valores foram acumulados para o período de 8 dias, com exceção do último valor de cada ano, cuja soma da GPP corresponde ao período de cinco ou seis dias (em caso de anos bissextos). Como o fAPAR se refere ao valor máximo de 8 dias e o EVI calculado das imagens de refletância de oito dias, o mesmo valor foi utilizado para todos os dias dentro do intervalo de oito dias.

Por fim, para cada estimativa de GPP modificada foram realizados dois testes, sendo um deles utilizando o mesmo valor de ε_{\max} usado pelo algoritmo MOD17 (Quadro 1) e a segunda estimativa com um ε_{\max} de 2,5 g C MJ m², conforme Teixeira et al. (2012) e Teixeira et al. (2013), que aplicaram esse valor para o município onde está inserido o sítio de Caatinga preservada objeto desse estudo. As duas estimativas são mostradas graficamente no que se refere a sua variação temporal e na regressão com a GPP_{ec}, e são diferenciadas com uso dos numerais 1 e 2 no final da sigla de cada estimativa de GPP presente no Quadro 2 (e. g. GPP_{otm_evi1} e GPP_{otm_evi2}, correspondendo a estimativa com $\varepsilon_{\max} = 1,281$ e $\varepsilon_{\max} = 2,5$, respectivamente).

3.4 Validação dos dados de satélite

A validação e a análise da precisão das estimativas de GPP derivada do MODIS foram realizadas por meio de alguns métodos estatísticos. Primeiramente, foram calculadas as estatísticas descritivas dos dados (média, mediana e desvio padrão), em escala mensal e de 8 dias. Além disso, foram realizadas análises de correlação e regressão linear simples para verificar o grau de relação entre a GPP_{mod} e GPP_{ec}, além de criar um modelo para ajustar os valores de GPP_{mod} a partir dos dados da torre.

O modelo gerado pela regressão linear foi avaliado por meio da análise dos resíduos, comparando os valores preditos pela equação de regressão e os resíduos padronizados, permitindo verificar a homocedasticidade dos resíduos. Além da análise gráfica dos resíduos, foi aplicado o teste de Durbin-Watson (DW) para avaliar se houve autocorrelação dos resíduos, evidenciando a premissa de independência dos erros. O resultado do teste de Durbin-Watson foi comparado com os limites superior e inferior presentes na tabela elaborada pelos autores. Para o nível de significância de 0,05, os limites inferior e superior identificados na tabela foram de, respectivamente, 1,73647 e 1,76027 para a regressão com a GPP de 8 dias ($n = 169$), e 1,47538 e 1,56602 para os dados mensais ($n = 45$). Sendo assim, se DW for maior que o limite superior, não há autocorrelação; se DW for menor que o limite inferior, então há uma autocorrelação positiva; ou se DW estiver entre os dois limites, o teste é inconclusivo. Também foi verificada a normalidade da distribuição dos erros através da probabilidade do valor esperado.

Por fim, aplicou-se o teste t de Student para verificar se a variação entre a GPP derivada do MODIS e a obtida por vórtices turbulentos era significativa ou não. Além disso, foram calculados raiz do erro quadrático médio (REQM) e o erro relativo (ER) e erro relativo médio (ERM) para medir a diferença percentual entre as médias de GPP_{mod} e GPP_{ec} de oito dias e a soma mensal, conforme as Equações 12 e 13:

$$\text{Erro relativo} = \frac{(GPP_{estimada} - GPP_{observada}) * 100}{GPP_{observada}} \quad (12)$$

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{\text{Soma } (GPP_{mod} - GPP_{ec})^2}{n}} \quad (13)$$

Devido a lacunas presentes nos dados derivados do MODIS e de medições de torre de vórtices turbulentos, foram removidas as observações de GPP_{mod} e GPP_{otm} ausentes para uma data específica. Assim, as comparações entre todas as variáveis basearam-se exatamente no mesmo conjunto de GPP_{ec} (total de 169 amostras de 8 dias). Para avaliar o desempenho dos modelos de GPP_{mod} e GPP_{otm} de acordo com a sazonalidade fenológica da vegetação, o conjunto de dados foi dividido em dois subconjuntos, sendo eles a estação chuvosa e seca.

3.5 Dados meteorológicos e ambientais

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo, referentes ao período entre 2011 e 2015, foram disponibilizados pela Embrapa Semiárido, e foram medidos por meio de instrumentos instalados na mesma torre onde está localizado o sistema de monitoramento dos fluxos de CO₂. Além disso, foram obtidos dados de precipitação pluviométrica da estação do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – Sonda (latitude: 09° 04' 08" S e longitude: 40° 19' 11" O), visando preencher algumas falhas presentes nos dados da torre de fluxos. Os dados estão disponíveis da página eletrônica do INPE (<<http://sonda.ccst.inpe.br/>>).

Na análise mensal da precipitação para o período de 2001 a 2016, foram obtidos dados pluviométricos disponibilizados gratuitamente por meio do sistema HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de precipitação da ANA são compostos de diversas estações pluviométricas de órgãos estaduais e federais, dentre eles a Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). Foi realizada uma filtragem nos dados, onde para cada ano (2001 a 2016) foi utilizada somente as estações que possuíam informações sem falhas. Nesse sentido, a quantidade de estações usadas em cada ano variou de 725 a 1054, nos anos de 2005 e 2010, respectivamente.

A espacialização da precipitação anual foi realizada por meio de interpolação espacial, utilizando o método Inverso do Quadrado da Distância (IDW), no *software* ArcGIS. Antes da aplicação desse método, foi realizado um teste de autocorrelação espacial de Moran's para verificar a possibilidade de utilização do método de interpolação *Kriging*, mas na maioria dos anos não houve autocorrelação entre os pontos.

O mapeamento de solos utilizado foi obtido por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em formato vetorial, na escala de 1:5.000.000. Cada classe de solo foi isolada para obtenção dos valores de estatística descritiva da produção primária bruta por classe de solo, processo realizado a partir da conversão das imagens de GPP em tabelas. Quanto as informações de uso e cobertura da terra, foram utilizados o produto MCD12 (cobertura da terra) e mapeamentos de uso e cobertura do semiárido brasileiro, disponibilizados pelo Instituto Nacional do Semiárido (INSA). Para ajudar na análise, também foi utilizado o *software* Google Earth Pro, em conjunto com os dados vetoriais já citados.

3.6 Análise espacial da produção primária bruta

Na segunda parte deste estudo, a GPP foi relacionada e correlacionada com a precipitação pluviométrica, os tipos de solo e com o uso e cobertura da terra. Sendo assim, na relação espacial e temporal com a precipitação, em escala anual, a GPP-MODIS foi corrigida por meio da equação de melhor ajuste aos dados observados da torre de fluxos. Além disso, todas as imagens anuais foram transformadas em tabelas para obtenção dos valores médios e acumulados de GPP para todo bioma Caatinga. Além disso, foi gerado um mapa com a média e o desvio padrão da precipitação e da GPP derivada do MOD17. Também foram gerados 1000 pontos aleatórios, no *software* ArcGis, e para cada ponto foram extraídos os valores mensais e anuais para, posteriormente, obter as médias anuais e mensais de todos os pontos. Com as médias de GPP desses pontos, procedeu-se a análise da variação e tendência linear dos dados.

A análise da GPP também foi realizada por meio de transectos gerados nos sentidos norte-sul e oeste-leste. Os transectos foram traçados de modo que abrangesse o máximo possível da área do bioma, e que demonstrasse um gradiente de variação de acordo com a precipitação, relevo e uso e cobertura do solo. Nessa análise, foi utilizada a imagem de GPP acumulada ao longo de todo período analisado (2001 a 2016), buscando identificar outros condicionantes ambientais da variação da produção primária bruta, além da precipitação pluviométrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação da produção primária bruta derivada do MODIS e de vórtices turbulentos em área de Floresta Tropical sazonalmente seca de Caatinga

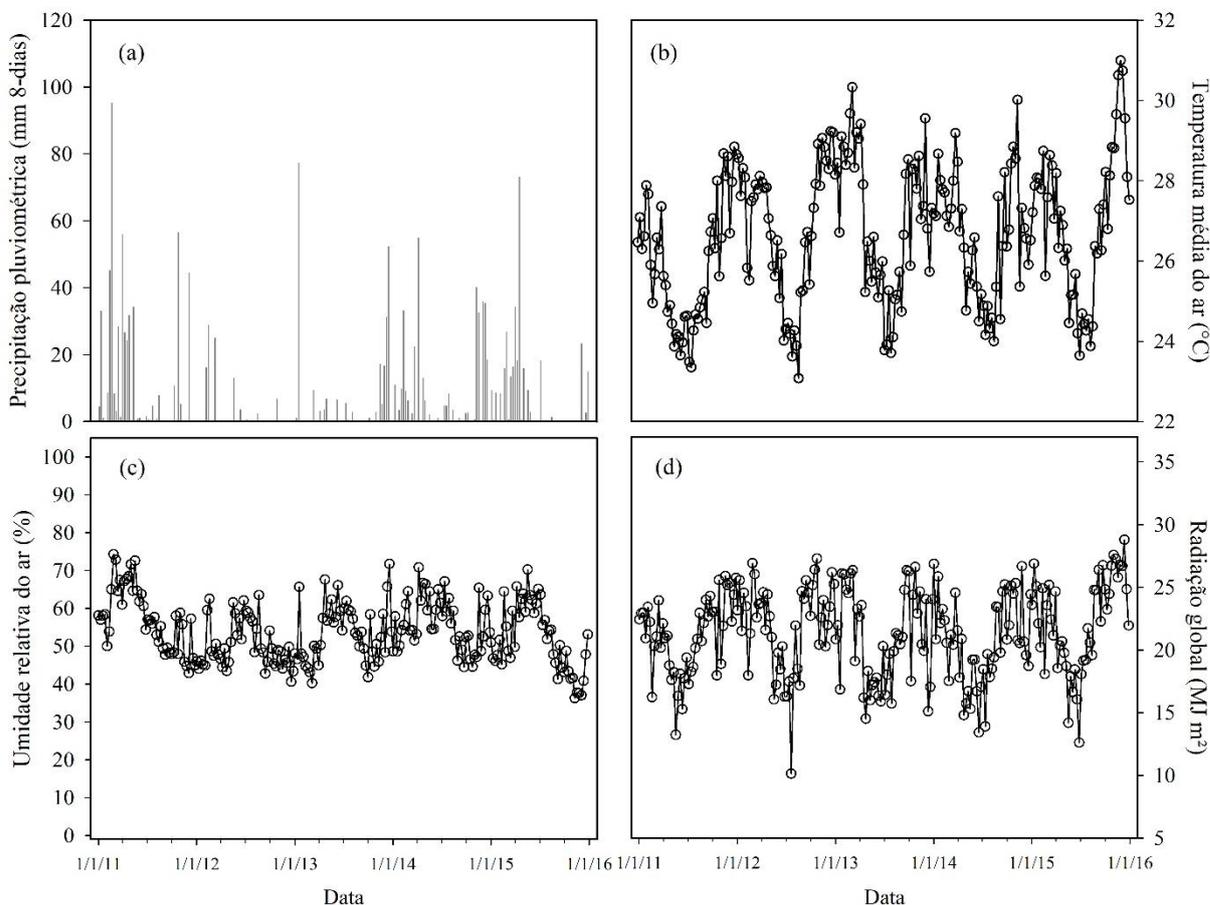
4.1.1 Caracterização climática do período de 2011 a 2015

A produção primária bruta da vegetação encontra-se associada às características climáticas de cada ambiente, em especial nas regiões secas. Nestas, a disponibilidade de água é o principal fator que limita a fotossíntese (REICHSTEIN et al., 2013; ZHANG et al., 2016a; ZHANG et al., 2016b), entretanto se faz necessário analisar o papel de outras variáveis meteorológicas no comportamento da assimilação de carbono. Dessa forma, a Figura 5 traz a variação da precipitação pluviométrica, da temperatura média do ar, da umidade relativa do ar e da radiação global para os anos de 2011 a 2015, de acordo com medições realizadas em área de caatinga preservada. As variáveis citadas estão representadas graficamente ao longo do tempo, com intervalos de oito dias, sendo a precipitação a soma diária a cada período de oito dias e as demais correspondem a média de 8 dias da média diária.

No período analisado (2011 a 2015), a precipitação esteve próxima a média histórica (510 mm) apenas no ano de 2011, com um total anual de 536 mm. O valor máximo foi registrado em fevereiro de 2011 (95,2 mm), sendo este ano o que mais apresentou acúmulo de precipitação acima de 20 mm (11 vezes). Por outro lado, de 2012 a 2015 a região de estudo passou por uma seca prolongada, o que influenciou negativamente os totais anuais de chuva (Figura 5a). Em 2012, por exemplo, a precipitação total foi de 96,5 mm, e houveram apenas dois períodos/8dias com precipitação acima de 20 mm. A precipitação máxima naquele ano foi de 28,9 mm, em fevereiro. Tal comportamento da precipitação corrobora com a caracterização climática do ano de 2012 presente no estudo de Souza et al. (2015), em área de caatinga preservada da Embrapa semiárido em Petrolina-PE.

A temperatura do ar média e a radiação global média apresentaram padrão sazonal semelhante (Figura 5b e 5d). Ambas registraram valores mais baixos, em geral, durante os meses de junho, julho e agosto, e valores mais elevados no final do ano e em janeiro. Na comparação interanual, o ano de 2013 obteve temperatura média mais elevada que os demais (27,002 °C), enquanto 2011 registrou temperatura média mais baixa, sendo de 25,83 °C. A umidade relativa do ar também apresentou padrão associado à precipitação, com valores mais elevados nos meses inseridos na estação chuvosa (Figura 5c).

Figura 5- Variação da precipitação pluviométrica (a), temperatura do ar (b), umidade relativa do ar (c) e radiação global (d) para o período de 2011 a 2015 medidos da torre micrometeorológica em área de Caatinga da Embrapa Semiárido, no município de Petrolina, estado de Pernambuco. A precipitação corresponde ao acumulado de oito dias, enquanto a temperatura do ar e umidade relativa referem-se a média de oito dias da média diária e a radiação a média de oito dias da soma diária.



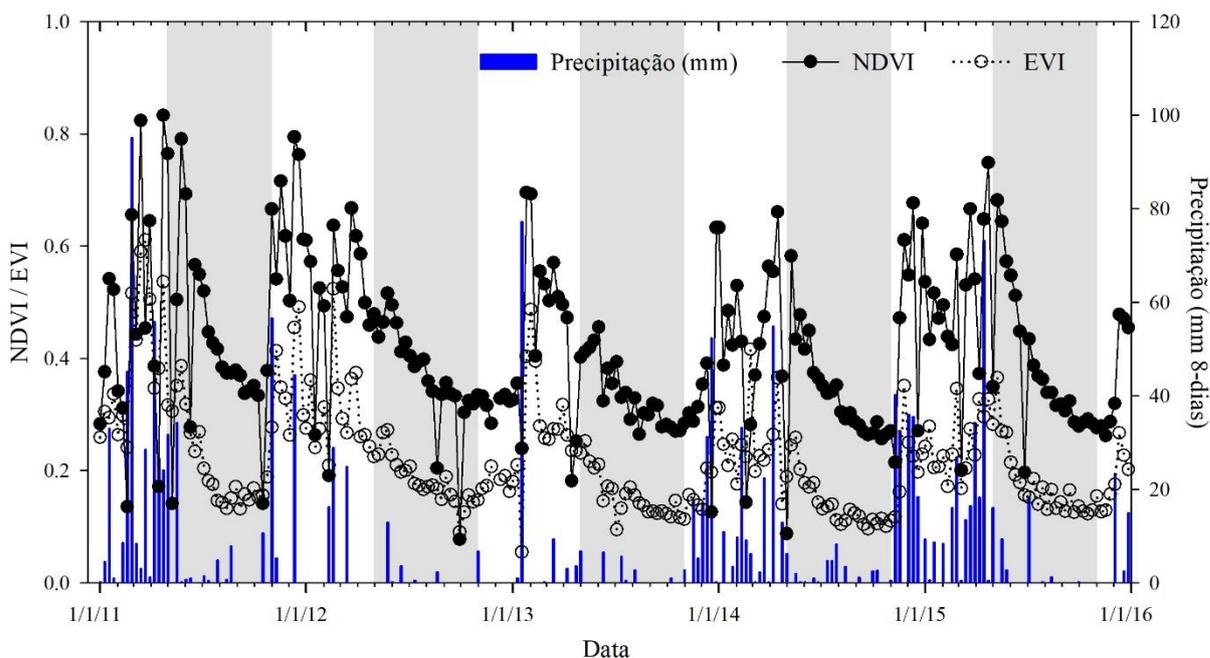
No ano de 2011, o comportamento dos elementos meteorológicos assumiu um padrão dentro da normalidade. Nos demais anos, a ocorrência de precipitação abaixo da média histórica influenciou os valores de temperatura, umidade e radiação global. Souza et al. (2015) caracterizaram as condições climáticas da área de caatinga da Embrapa Semiárido no ano de 2012 e constataram valores de temperatura média do ar e radiação global mais elevados, quando comparados com a normal climatológica. Além disso, foram verificados valores de umidade relativa mais baixos, o que corrobora com o comportamento apresentado ao longo do período de seca prolongado analisado neste estudo. Silva et al. (2017), avaliando os fluxos de energia e carbono em área de Caatinga e de pastagem, no município de Serra Talhada, no estado de Pernambuco, encontraram valores de R_g entre 5,8 a 28,5 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de 2014 a 2015. Os autores também constataram que os maiores valores de temperatura do ar (acima de 25 °C) foram registrados no período úmido, enquanto os menores valores foram obtidos no período seco, seguindo as variações da radiação global.

4.1.2 Análise da fenologia da Caatinga por meio de índices de vegetação

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de vegetação Melhorado (EVI) foram avaliados para identificar os padrões fenológicos da vegetação de caatinga e estabelecer relações com a assimilação de carbono. Esses índices, inclusive, possuem estreita relação com a atividade fotossintética e o vigor da vegetação, e têm sido utilizados para estimar a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR), componente presente no cálculo da GPP. Sendo assim, é possível observar, por meio da Figura 6, que o NDVI e EVI tiveram padrão de variação condicionado pela precipitação pluviométrica.

O NDVI apresentou média de 0,41 ao longo do período de 2011 a 2015, com máximo de 0,83 no final do mês de abril (23/04) de 2011. O EVI registrou média de 0,22 e o valor máximo foi observado no final de março de 2011 (0,61). Os picos mais elevados de precipitação provocaram uma resposta fenológica da vegetação, enquanto eventos de chuva de intensidade fraca (<10mm), sobretudo no período seco, não influenciaram o EVI e o NDVI.

Figura 6- Variação temporal do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), do Índice de Vegetação Melhorado (EVI) e da precipitação pluviométrica acumulada de oito dias da área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. As faixas de cor cinza representam a estação seca na região.

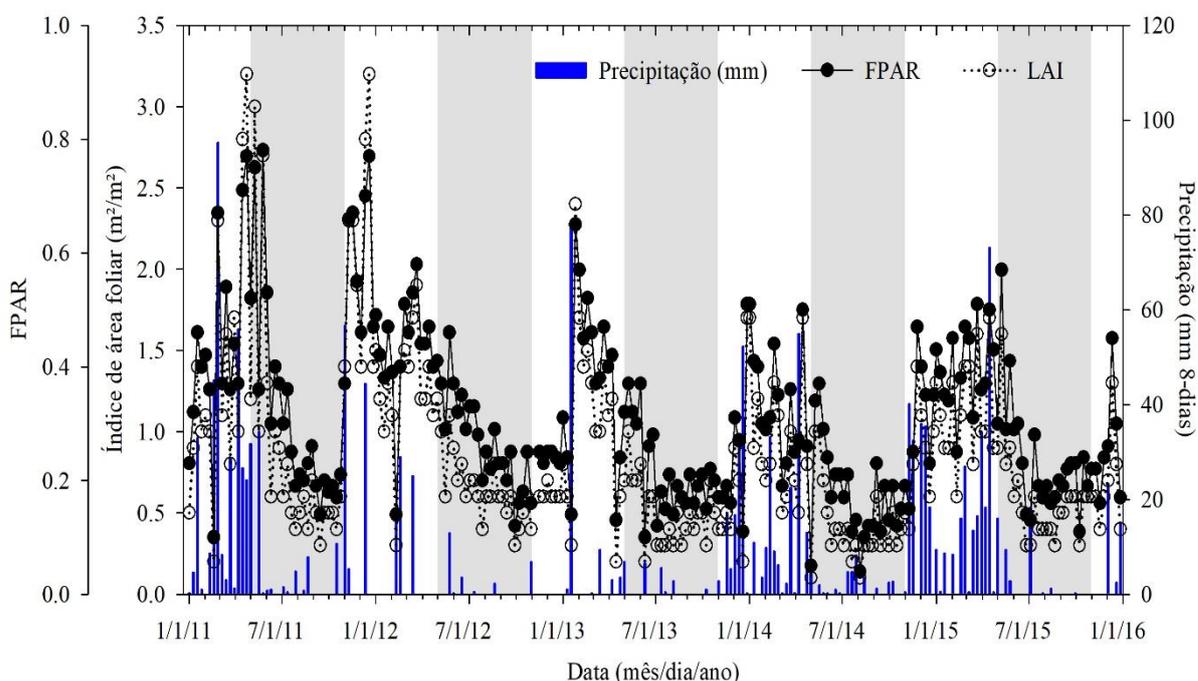


Em uma comparação interanual dos índices NDVI e EVI, verificou-se que o ano de 2011 apresentou o maior valor médio para ambos os índices, no decorrer do período de 2011 a 2015, sendo de $0,48 \pm 0,19$ e $0,30 \pm 0,13$, respectivamente. Em contrapartida, o menor valor

médio do NDVI foi registrado em 2013 ($0,37\pm 0,12$) e em 2014 para o EVI ($0,19\pm 0,08$). Esses valores estatísticos reforçam a relação dos IV's com a precipitação, pois os maiores valores médios e desvio padrão foram encontrados em 2011, ano com maior acúmulo anual de chuva. A dinâmica sazonal do EVI difere um pouco da variação do NDVI ($r^2 = 0,47$). Em 2011, por exemplo, o EVI atingiu seu valor máximo no final do mês de março, enquanto o NDVI máximo ocorreu no final de abril. O EVI apresentou menos ruídos do que o NDVI, principalmente na estação chuvosa, podendo estar relacionado a uma influência maior da nebulosidade no NDVI.

O fAPAR e o LAI também apresentaram padrão sazonal influenciado pela precipitação pluviométrica (Figura 7). Como esperado, as duas variáveis tiveram variação semelhante, com valores mais altos no período chuvoso e mais baixos na estação seca. De 2011 a 2015, o LAI apresentou média de $0,85\pm 0,56 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e o fAPAR de $0,31\pm 0,15$. O ano de 2011 foi o que apresentou o maior valor médio de fAPAR (0,4), enquanto em 2014 houve a menor média, sendo de 0,25. Entre 2012 e 2015 não foram registrados valores de fAPAR superiores a 0,65, como consequência do déficit hídrico mais elevado nesses anos. Por outro lado, independentemente da quantidade de chuvas, todos os anos demonstraram fAPAR mínimo próximo a 0,1 (Figura 7).

Figura 7- Variação temporal do Índice de Área Foliar (LAI), da Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FPAR) e da precipitação pluviométrica acumulada de oito dias da área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. As faixas de cor cinza representam a estação seca na região.



Assim como o fAPAR, o LAI apresentou valor médio anual mais elevado em 2011 ($1,23 \text{ m}^2/\text{m}^2$) e máximo de $3,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ no mesmo ano, no final dos meses de abril e de dezembro. Além disso, observou-se, ainda, que o valor mínimo do LAI foi de $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ em alguns períodos isolados, mas ao longo da estação seca foram registrados valores mais altos ($0,2$ a $0,3 \text{ m}^2/\text{m}^2$). Como a vegetação da área de estudo é caracterizada pela perda de suas folhas durante o período seco e pela fotossíntese praticamente nula, é provável que os resultados do LAI e, conseqüentemente, do fAPAR, tenham sido influenciados pela refletância de elementos não fotossintetizantes, como ramos e caules.

4.1.3 Validação e variabilidade da GPP de 8 dias

A produção primária bruta derivada da versão 6 do produto MODIS foi avaliada a partir da comparação com os dados de vórtices turbulentos, medidos em uma área de caatinga preservada no município de Petrolina, Pernambuco. Durante o período de 2011 a 2015, a GPP derivada do MODIS apresentou uma média de $2,47 \pm 1,33 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e a GPP medida pelo sistema de vórtices turbulentos registrou média de $1,91 \pm 2,31 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Observa-se, no geral, que o algoritmo da GPP_{mod} subestimou os valores durante parte da estação chuvosa e, em contrapartida, houve uma superestimativa durante o período seco (Figura 8). Além disso, a GPP_{mod} conseguiu capturar bem a sazonalidade da precipitação na região, pois notou-se um decréscimo dos valores a partir do final da estação úmida ou logo após um período sem ocorrência de chuvas. Durante o ano de 2011, por exemplo, ao término do período chuvoso a GPP_{mod} e a GPP_{ec} registraram valores de $7,31$ e $7,75 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente. Contudo, após cerca de um mês reduziu em mais da metade ($2,46$ e $2,86 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Esse padrão de resposta a ocorrência de chuvas também foi verificado nos demais anos analisados (*e. g.* novembro e dezembro de 2013).

A GPP_{mod} e a GPP_{ec} apresentaram um padrão sazonal semelhante, sendo condicionado pela ocorrência de precipitação, o que pode ser constatado através dos picos de GPP associados a ocorrência de eventos de chuva. Isto também influenciou na estatística descritiva dos dados, pois no decorrer do período de 2011 a 2015, a GPP_{mod} registrou valor máximo em abril de 2011 ($7,46 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e mínimo em agosto de 2014 ($0,29 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), enquanto a GPP_{ec} teve máxima em março de 2011 ($12,96 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e mínimo em junho de 2012 ($0,025 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Sendo assim, os valores máximos de GPP_{mod} e GPP_{ec} registrados no ano de 2011 foram influenciados pela precipitação mais elevada naquele ano, enquanto nos demais anos analisados a precipitação esteve abaixo da média. O ano de 2012, apesar de ter sido o mais seco do período

analisado, teve os valores de GPP_{mod} do início do ano influenciados pela precipitação registrada em novembro e dezembro de 2011. Por isso, a GPP média (8 dias) foi um pouco mais baixa em 2013.

Figura 8- Variação temporal da produção primária bruta derivada do MODIS e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015.

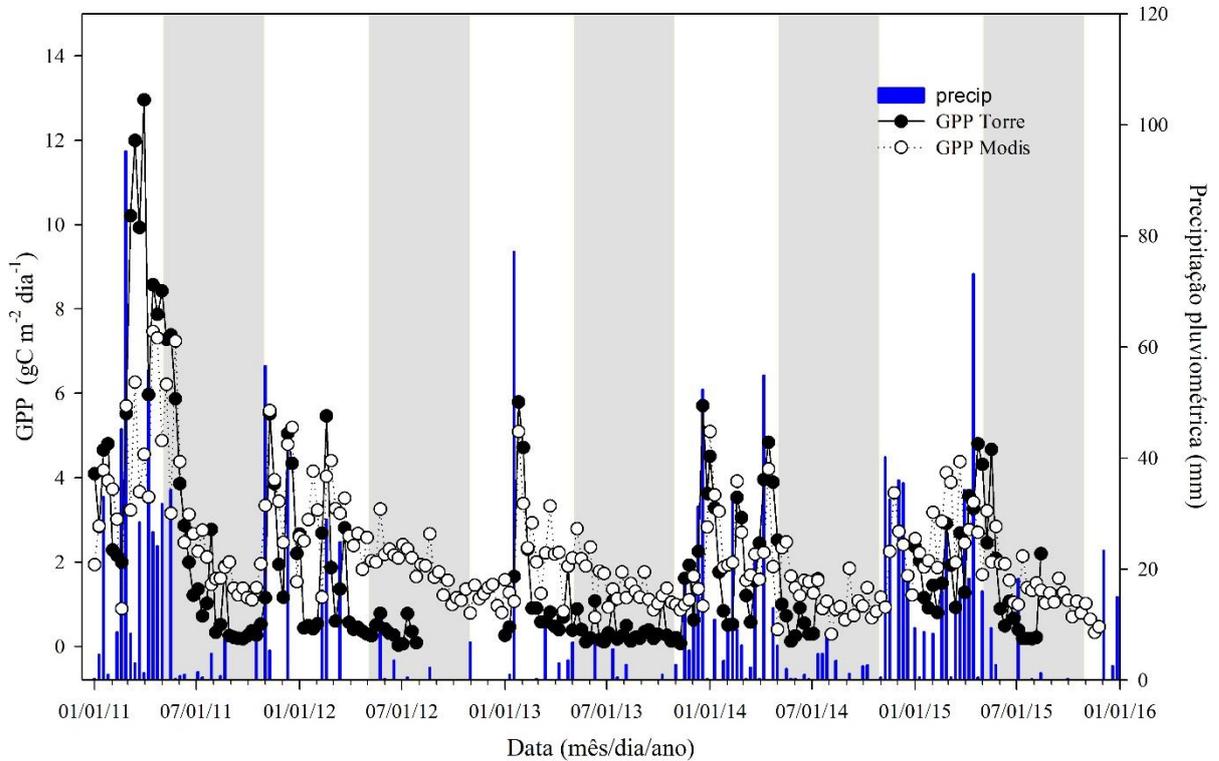
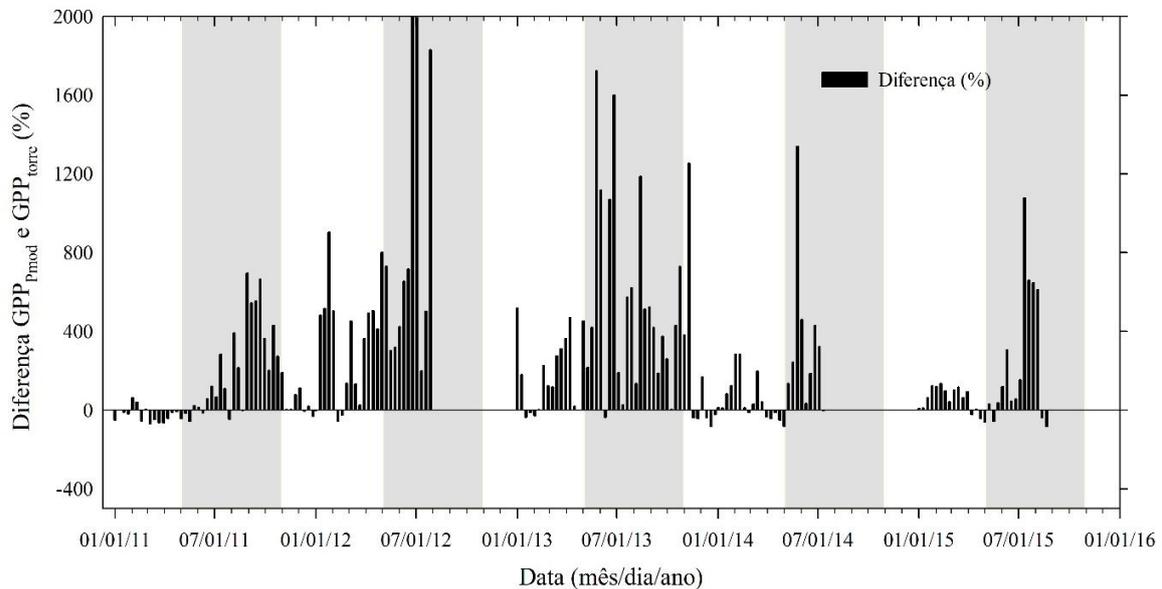


Figura 9- Erro relativo da estimativa da produção primária bruta (GPP) derivada do MODIS em relação aos dados de GPP medidos pelo sistema de covariância de vórtices turbulentos em área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.

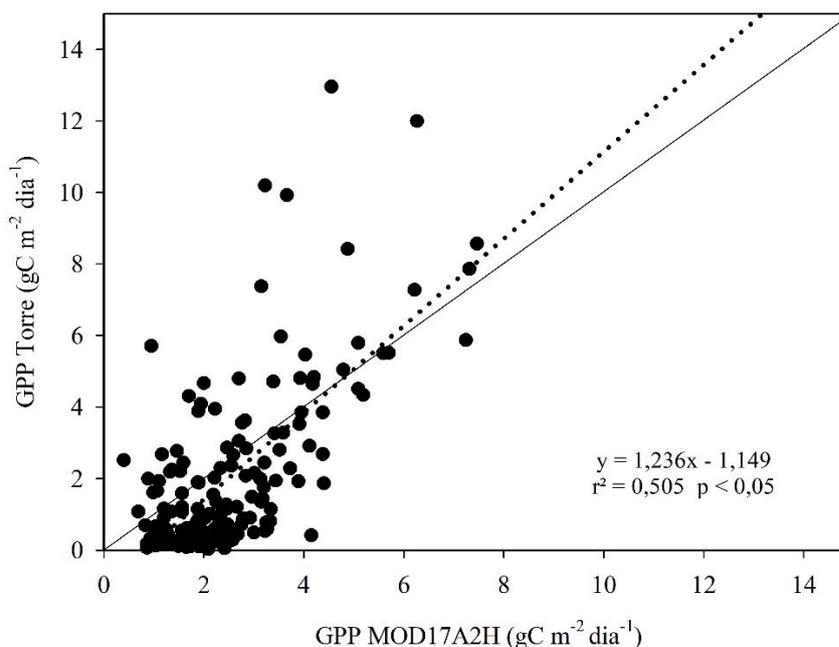


De acordo com Coops et al. (2007), um dos principais pontos fortes das estimativas de GPP-MODIS é sua capacidade de capturar dinâmicas sazonais da produção fotossintética. Kanniah et al. (2009) também verificaram que, em geral, as tendências sazonais de GPP foram capturadas pelo MODIS para todos os seis anos analisados. Outros estudos demonstram o potencial que o algoritmo MODIS tem em evidenciar a dinâmica sazonal da produção primária vegetal (HEINSCH et al., 2006; LEUNING et al., 2005; TURNER et al., 2006).

Quando se compara as diferenças entre os dados derivados do MODIS e de vórtices turbulentos, a estimativa da GPP_{mod} apresenta menores erros (%) durante a estação chuvosa, apesar da subestimativa dos dados (Figura 9). No período chuvoso do ano de 2011, o maior valor de erro relativo foi de -64,89%, enquanto que na estação seca o máximo foi de 695,2%. Nos outros anos, houveram erros maiores que 100% dentro do período chuvoso, sendo o ano de 2012 o que apresentou o maior erro relativo médio para a estação chuvosa (228,06%). Em alguns períodos de 8 dias inseridos na estação seca, a GPP_{mod} apresentou um erro relativo muito elevado, superior a 1000%, demonstrando incapacidade do algoritmo MOD17 em estimar com precisão a GPP de período de déficit hídrico prolongado. Alvares-Taboada et al. (2015) verificaram discrepâncias entre a GPP_{mod} e a GPP_{ec} durante períodos em que a atividade fotossintética foi mais baixa, com superestimava em quase todos os sítios analisados e com diferenças percentuais superiores a 1000%.

A regressão linear simples entre a GPP_{mod} e a GPP_{ec} , para o período entre 2011 e 2015, apresentou significância estatística ($p < 0,05$) (Tabela 2) e coeficiente de determinação de 0,505. Os dados não se encontram bem distribuídos ao longo da linha de regressão e da 1:1. A maior parte dos dados se encontram abaixo da linha 1:1, demonstrando a superestimativa do algoritmo MODIS-GPP (Figura 10). Na análise da regressão foram removidos alguns dados da GPP_{mod} , que apresentaram comprometimento de sua estimativa em decorrência da alta nebulosidade para o período. Esses dados foram filtrados por meio do produto de qualidade do pixel do fAPAR, que consiste na única entrada derivada de sensoriamento remoto no algoritmo MODIS-GPP.

Figura 10- Regressão linear entre a produção primária bruta derivada do produto MOD17A2H e medida pelo método de vórtices turbulentos para área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).



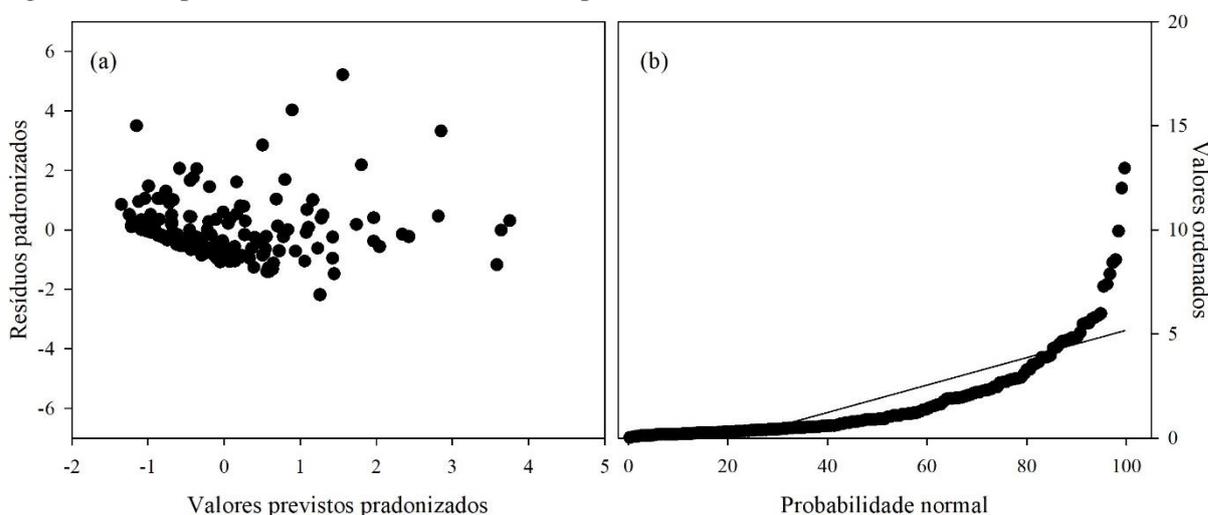
Na comparação entre a GPP_{mod} e GPP_{ec} separando o período chuvoso e seco, a regressão com melhor desempenho foi obtida para a estação seca ($r^2 = 0,47$), enquanto no período de chuvas o r^2 foi de 0,42. No entanto, a quantidade de observações inseridas na estação seca foi menor devido às falhas presentes nos dados de fluxos de CO_2 medidos na torre micrometeorológica. Na estação chuvosa, a GPP_{mod} conseguiu responder bem as variações na atividade fotossintética de acordo com a ocorrência de chuvas, o que pode ser verificado pela correspondência dos picos mais elevados de GPP_{ec} e GPP_{mod} . Enquanto isso, no período seco observou-se que a GPP_{ec} respondeu mais rapidamente a ocorrência de pequenos eventos de chuva, tanto no aumento imediato da assimilação de carbono como na redução logo após a precipitação.

Tabela 2. Resultados do teste ANOVA para a regressão linear simples entre a GPP derivada do MODIS e a GPP observada média de 8 dias, com nível de significância de 0,05.

	Soma dos Resíduos	Graus de liberdade	Média dos Resíduos	F	Sig.
Regressão	452,412	1	452,412	170,409	< 0,0001
Resíduo	443,361	167	2,655		
Total	895,773	168			

Na análise dos resíduos observa-se que eles apresentaram uma certa tendência em sua distribuição, consistindo em um comportamento de heterocedasticidade, ou seja, os resíduos aumentam conforme o aumento dos valores previstos pelo modelo (Figura 11a). O valor do teste de Durbin-Watson (1,029) indica que há uma autocorrelação positiva, o que pode ser verificado pelo agrupamento de resíduos de mesmo sinal (Figura 7a). Além disso, os resíduos não apresentam, em geral, uma distribuição normal (Figura 11b). Sendo assim, a equação de regressão deve ser aplicada com cautela, pois alguma variabilidade do relacionamento entre as variáveis não pode ser explicada pelo modelo.

Figura 11- Relação entre os resíduos padronizados e os valores de GPP previstos pela equação de regressão (a) e probabilidade normal dos valores previstos ordenados (b).



Os resultados encontrados neste estudo corroboram com aqueles registrados em diversos sítios ao redor do planeta. As diferenças percentuais elevadas entre a GPP_{mod} e GPP_{ec} , sobretudo na estação seca, é relatada na literatura diante de uma precisão limitada do algoritmo MODIS GPP em estimar, por exemplo, a GPP de savanas (JIN et al., 2013; KANNIAH et al., 2009; SJOSTROM et al., 2013). Jin et al. (2013), em estudo localizado em um sítio de savana na Botsuana, verificaram que o produto de GPP do MODIS foi substancialmente menor do que a GPP_{ec} no período de crescimento vegetativo e superior à torre durante a fase de senescência.

Almeida et al. (2018) avaliaram o desempenho da GPP-MODIS em áreas da Amazônia brasileira, e constataram que o produto MOD17 GPP apresentou limitações na estimativa da sazonalidade, magnitude e variações espaciais da GPP nos sítios tropicais estudados. O MOD17 superestimou a GPP em locais de baixa produtividade e o subestimou em locais de alta produtividade. Tais resultados também foram obtidos por Turner et al. (2006) e Wang et al. (2017). Em contrapartida, Sjostrom et al. (2013), em estudo realizados em sítios de torres de

fluxos na savana africana, relataram que o MODIS-GPP subestimou os valores de GPP em relação aos dados de vórtices turbulentos em locais secos da região do Sahel, sendo um resultado oposto ao encontrado neste estudo. Os autores atrelaram essa subestimativa às incertezas presentes nos dados meteorológicos de entrada do algoritmo MOD17, do fAPAR e da subestimativa da eficiência máxima de uso da luz.

Gilbert et al. (2005) avaliaram as estimativas de GPP_{mod} em sete sítios de ecossistemas mediterrâneos, e identificaram que a correlação entre os dados do MODIS e da torre diminui conforme o aumento da aridez. Em locais mais áridos, o coeficiente de determinação variou de 0,29 a 0,51 no ano de 2008 e 0,57 a 0,64 em 2011 (ano com precipitação superior à média). Sendo assim, um dos principais fatores que tem sido apontado como responsável pela superestimativa da GPP pelo algoritmo MOD17 em ambientes semiáridos é a ineficácia do DPV em capturar a influência de episódios de estresse hídrico intensos e prolongados (LEUNING et al., 2005). Isso ocorre porque o DPV não incorpora explicitamente o déficit hídrico do solo nas trocas gasosas (FENSHOLT et al., 2006; COOPS et al., 2007; YUAN et al., 2007; ZHANG et al., 2007; HEINSCH et al., 2006).

A substituição do DPV, como reguladora da LUE, por outros fatores de estresse hídrico tem mostrado melhores resultados (KANNIAH et al., 2009; YAN et al., 2015; YUAN et al., 2007). Kanniah et al. (2009) e Almeida et al. (2018) utilizaram a fração evaporativa como parâmetro de restrição da LUE, enquanto Gilbert et al. (2015) utilizou uma razão entre a evapotranspiração real e potencial; outros autores usaram índices espectrais, como o Índice de Umidade Global da Vegetação – GVMI (JAHAN e GAN, 2009) e o Índice de Água da Diferença Normalizada – NDWI (XIAO et al., 2010).

A tabela 3 traz os valores dos coeficientes de determinação das regressões entre GPP_{ec} e GPP_{mod} com os principais parâmetros de entrada do algoritmo GPP-MODIS. Portanto, observou-se que a fração evaporativa foi responsável por explicar 78% da variabilidade da GPP_{ec} e 66% da GPP_{mod} . Das variáveis derivadas do sensoriamento remoto, o EVI foi o que apresentou a melhor relação com a GPP_{ec} ($r^2 = 0,55$). A regressão entre o LAI-fAPAR com a GPP_{mod} obteve coeficiente alto, mas esse resultado pode ser relativizado pelo fato dessas variáveis serem utilizadas diretamente no cálculo da GPP_{mod} . A temperatura do ar não se correlacionou com a GPP_{ec} e GPP_{mod} e a precipitação pluviométrica só mostrou relação com a GPP quando foi colocado um atraso de 8 dias na correlação. Ou seja, 34,5% e 31,3% da variação da GPP_{ec} e GPP_{mod} , respectivamente, podem ser explicadas pela precipitação do período de 8 dias anterior.

Tabela 3. Coeficiente da regressão entre a GPP_{torre} e GPP_{modis} com variáveis utilizadas no cálculo da GPP_{mod} e GPP_{otm} e com outras variáveis meteorológicas para área de caatinga preservada.

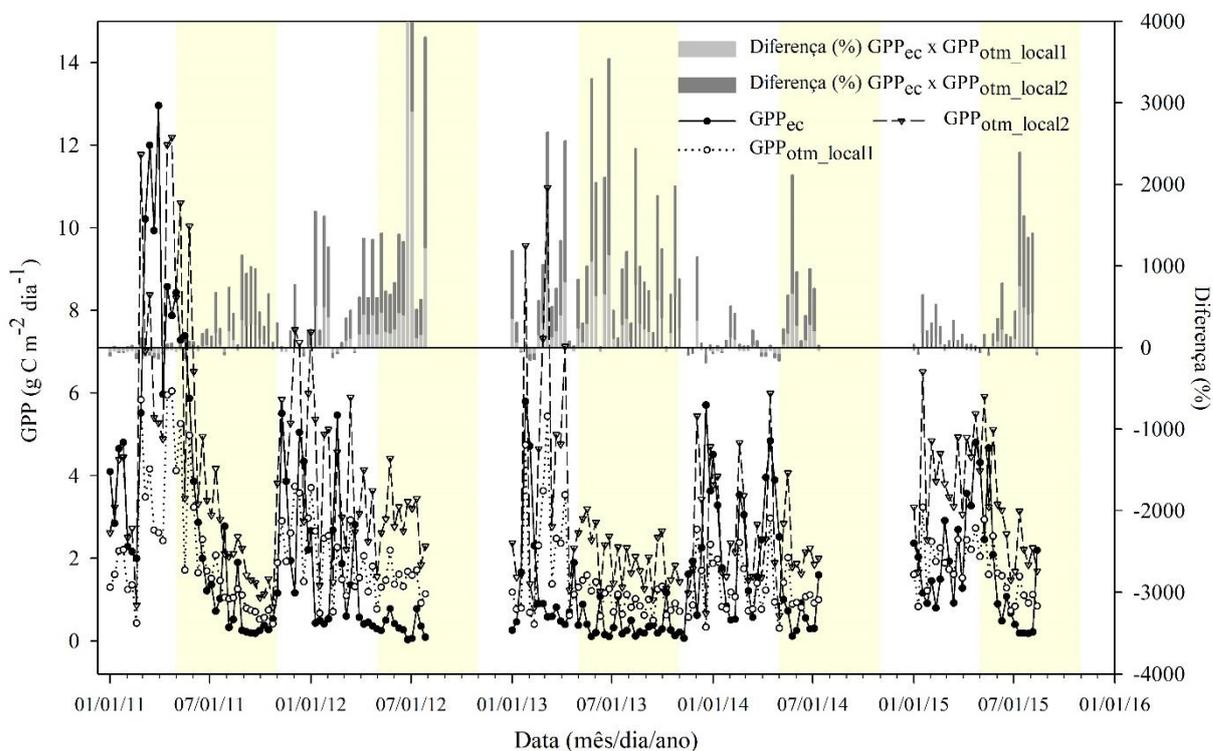
Variáveis utilizadas no cálculo da GPP _{mod} e GPP _{otm}	GPP torre	GPP modis
LAI	0,304	0,8107
FPAR	0,2678	0,8315
NDVI	0,1356	0,408
EVI	0,5536	0,6648
Fração evaporativa	0,7853	0,3677
Radiação global	0,00008	0,0003
DPV	0,12	<0,001
Temperatura do ar	0,001	0,003
Precipitação	0,12	0,065
Precipitação (leg-8 dias)	0,345	0,313

Diante das imprecisões na estimativa da GPP_{mod}, sobretudo, no período seco, buscou-se realizar melhorias na estimativa da GPP, utilizando a mesma lógica do algoritmo MOD17, com a substituição de algumas variáveis e utilização de dados meteorológicos medidos na torre da Caatinga. A primeira estimativa da GPP com o algoritmo MOD17 modificado (GPP_{otm_local}) fez uso de dados meteorológicos locais como entrada no algoritmo MOD17, em contraposição aos dados do GMAO usados no MODIS-GPP (Figura 12). No período de 2011 a 2015, a GPP_{otm_local} apresentou média de 1,72 g C m⁻² dia⁻¹ e 3,46 g C m⁻² dia⁻¹, com uso da ϵ_{\max} do MOD17 e $\epsilon_{\max} = 2,5$ g C MJ⁻¹, respectivamente. Observou-se que a GPP_{otm_local} não capturou bem a sazonalidade da assimilação de carbono na Caatinga e houve uma superestimativa da GPP ao longo dos períodos mais secos. Nos períodos com menor disponibilidade hídrica, a variação da GPP_{otm_local} não esteve associada com a GPP_{ec} e, conseqüentemente, observou-se uma piora nas estimativas tanto em magnitude como na sazonalidade ($r^2 = 0,31$; $p < 0,05$; REQM GPP_{otm_local1} = 1,98 g C m⁻² dia⁻¹ e REQM GPP_{otm_local2} = 2,65 g C m⁻² dia⁻¹) (Figura 15).

A correlação fraca entre o DPV e a GPP_{ec} foi responsável por reduzir o coeficiente de determinação da regressão entre a GPP_{otm_local} e a GPP_{ec}, quando comparado a GPP derivada do algoritmo MOD17 sem modificações. Além disso, a estimativa de GPP com dados locais apresentou erros relativos elevados, sobretudo no período seco ou em períodos mais secos

dentro da estação chuvosa, confirmando a ineficiência do DPV como fator limitante da eficiência máxima do uso da luz.

Figura 12- Variação temporal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015. GPP_{ec} é a GPP derivada da torre; GPP_{otm_local1} é a estimada pelo algoritmo MOD17 usando dados meteorológicos medidos localmente, com ϵ_{max} de 1,239; e GPP_{otm_local2} também foi estimada da mesma forma que a anterior, com ϵ_{max} de 2,5.

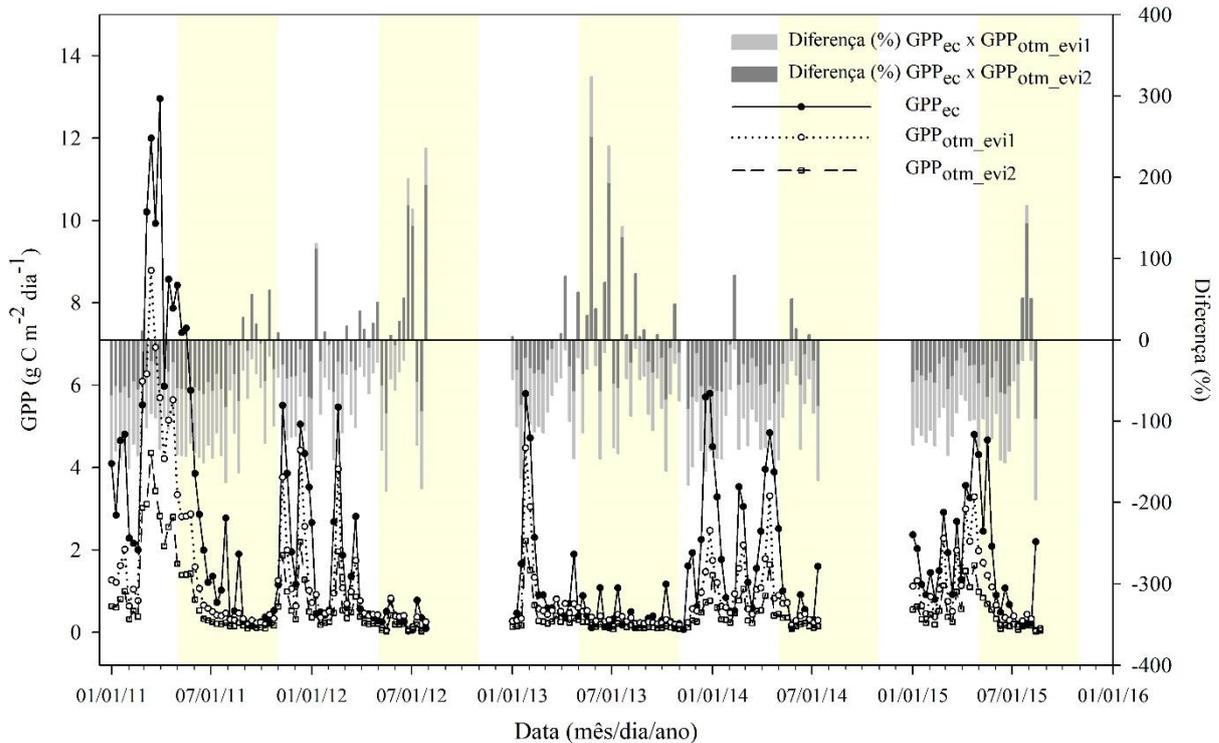


A segunda estimativa da GPP modificada foi realizada com a utilização de dados de radiação global medido localmente, EVI derivado do MOD09 e a substituição da T_{MIN} e VPD_{MIN} pela fração evaporativa como reguladora da eficiência máxima do uso da luz. Sendo assim, a Figura 13 mostra a variação temporal da GPP_{ec} e GPP_{otm_evi} média de 8 dias, sendo esta testada com o uso de dois valores de ϵ_{max} . Observa-se, portanto, uma melhoria na precisão da estimativa da GPP, sobretudo no período seco. No geral, houve uma subestimativa da GPP melhorada, com erro relativo médio de -20,2%. Essa subestimativa foi maior nos picos mais elevados de GPP_{ec} , enquanto que os valores sobrestimados foram registrados principalmente na estação seca (Figura 13).

Ao longo do período de 2011 a 2015, a GPP_{otm_evi} apresentou valor médio de $1,12 \pm 1,47$ $g C m^{-2} dia^{-1}$ e $0,557 \pm 0,712$ $g C m^{-2} dia^{-1}$ para o cálculo com a ϵ_{max} de 2,5 e $1,281$ $g C MJ^{-1}$, respectivamente. A estimativa da GPP com o EVI e ϵ_{max} do MOD17 reduziu os valores de GPP, quando comparadas com o cálculo utilizando o fAPAR, pois ao longo do período analisado o

EVI apresentou valores mais baixos em relação ao fAPAR e ao NDVI, o que influencia diretamente da quantidade de PAR absorvida pela vegetação.

Figura 13- Variação temporal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015. GPP_{ec} é a GPP derivada da torre; GPP_{otm_evi1} é a estimada pelo algoritmo MOD17 modificado usando o EVI e a FE, com ε_{max} de 1,239; e GPP_{otm_evi2} também foi estimada da mesma forma que a anterior, com ε_{max} de 2,5.

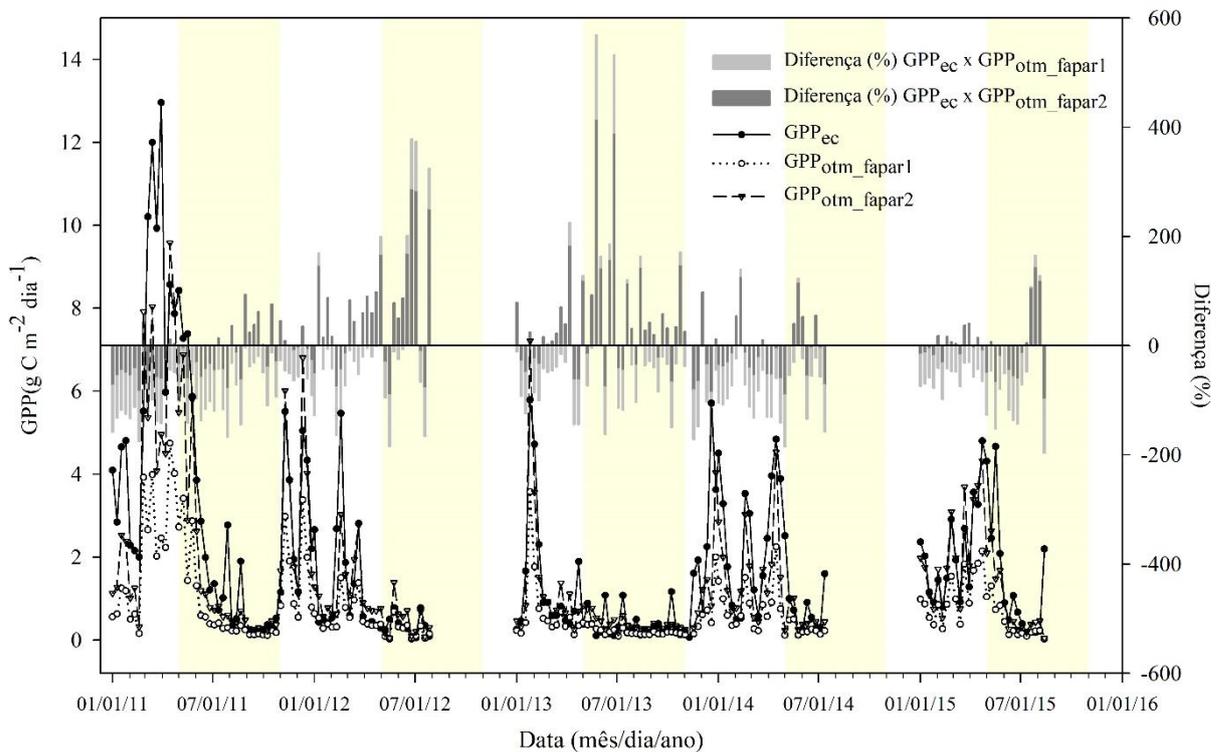


Quanto a variabilidade temporal e a sazonalidade da GPP, nota-se que a GPP_{otm_evi} capturou bem o início e o término do período chuvoso e a variabilidade da assimilação de carbono da Caatinga, o que pode ser evidenciado através da forte correlação entre a GPP_{ec} e GPP_{otm_evi} ($r^2 = 0,83$, $p < 0,05$, $REQM_{otm_evi1} = 2,23$ g C m² e $REQM = 1,47$ g C m² dia⁻¹) (Figura 15). Alguns picos de GPP inseridos na estação seca, que estão associados a eventos de chuva de pequena intensidade, não foram bem captados pela GPP_{otm_evi} , provavelmente devido ao uso do EVI constante para cada período de 8 dias.

Um terceiro cálculo foi realizado com o uso do $fAPAR_{mod15}$ e da fração evaporativa como reguladora da LUE (Figura 14), o que também resultou em uma maior precisão das estimativas de GPP, quando comparadas com a GPP_{ec} ($r^2 = 0,71$, $p < 0,05$, $REQM_{GPP_{otm_fapar1}} = 2,077$ g C m² dia⁻¹ e $REQM_{GPP_{otm_fapar2}} = 1,36$ g C m² dia⁻¹) (Figura 15). O valor médio para o período de 2011 a 2015 foi de 0,75 e 1,51 g C m⁻² d⁻¹ para as estimativas com $\varepsilon_{max} =$

1,281 e 2,5 g C MJ dia, respectivamente. Além disso, as diferenças percentuais foram mais baixas, em relação a GPP-MODIS e em relação a GPP_{otm_evi} . Em alguns períodos de 8 dias, a GPP_{otm_fapar} superestimou os valores de GPP, o que não tinha sido verificado na estimativa de GPP_{otm_evi1} e GPP_{otm_evi2} (Figura 13). Tanto a GPP_{otm_evi} como a GPP_{otm_fapar} com ϵ_{max} do MOD17 produziram subestimativa elevada da GPP durante o período chuvoso, indicando uma limitação do algoritmo no que se refere ao uso de um valor de ϵ_{max} que não varia ao longo do tempo e nem para as diferentes fisionomias de um bioma.

Figura 14- Variação temporal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado e pelo método de covariância de vórtices turbulentos para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015. GPP_{ec} é a GPP derivada da torre; GPP_{otm_fapar1} é a estimada pelo algoritmo MOD17 modificado usando o fAPAR e a FE, com ϵ_{max} de 1,239; e GPP_{otm_fapar2} também foi estimada da mesma forma que a anterior, com ϵ_{max} de 2,5.



O uso da ϵ_{max} de 2,5 g C MJ⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2013) resultou nos melhores resultados em relação aos erros relativos e raiz do erro quadrático médio. No período chuvoso, cuja disponibilidade de água não limita tanto a fotossíntese, quando mais elevado for o valor de ϵ_{max} , maior será a GPP. Contudo, a obtenção de um valor preciso de ϵ_{max} ainda necessita de estudos específicos, pois é um parâmetro de difícil parametrização uma vez que varia significativamente entre os tipos de vegetação, ao longo de fenofases e sob diferentes tipos de estresse ambiental (KERGOAT et al., 2008; JENKINS et al., 2007). Uma das principais

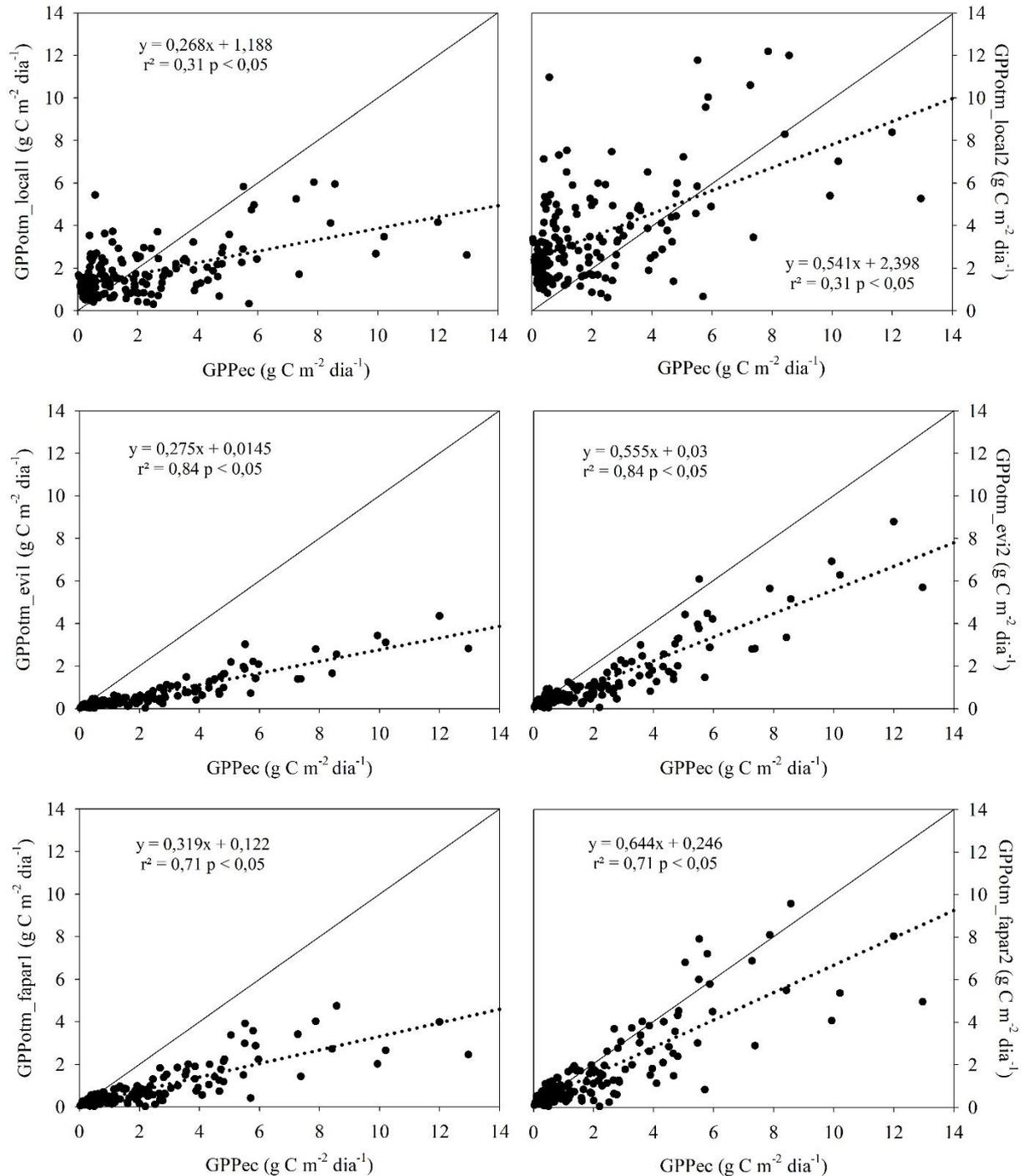
incertezas do algoritmo MODIS reside no uso de LUE_{max} constante para um determinado tipo de bioma, sendo limitado com base nos escalares VPD e TMIN. De acordo com Zhang et al. (2012) a relação entre GPP e APAR não é linear ao nível individual da folha, sendo caracterizada pela heterogeneidade espaço-temporal associada a vários níveis de iluminação. Portanto, a não consideração da diferença da LUE entre folhas iluminadas pelo sol e sombreadas limitam o desempenho dos modelos baseados na eficiência do uso da luz, como é o MOD17 (ZHANG et al., 2012).

Kanniah et al. (2009) calcularam a LUE mensal para o ecossistema de savana na Austrália, e verificaram que a savana utilizava a radiação de forma mais eficiente na estação chuvosa. Além disso, os autores obtiveram a ϵ_{max} com base na média dos seis maiores valores mensais (de 2001 a 2006), resultando no valor de $1,26 \text{ g C MJ}^{-1}$ (18% maior do que o valor utilizado pelo algoritmo MODIS-GPP para mesmo tipo de cobertura. No mesmo estudo, também foi observado que o DPV foi responsável por explicar 49% da variação observada na LUE mensal, 36% na estação chuvosa e menos de 1% no período de estiagem. A temperatura não se relacionou com a LUE ($r^2 = 0,05$), enquanto a umidade do solo a 10 cm teve uma maior influência na variação da LUE ($r^2 = 0,59$), quando comparado com as demais variáveis (KANNIAH et al., 2009). Eamus et al. (2001), analisando os padrões sazonais dos fluxos de carbono em uma área de savana na Austrália, constaram uma fraca influência do DPV na transpiração e na condutância estomática durante a estação seca.

O uso da fração evaporativa (FE) como reguladora da eficiência do uso da luz resultou em uma melhora nas estimativas de GPP, principalmente no período seco e com a $\epsilon_{max} = 2,5 \text{ g C MJ}^{-1}$. Kanniah et al. (2009) também substituíram o DPV pela FE para estimar a GPP de savanas, o que resultou na redução da GPP_{mod} na estação seca e na melhoria da captura do início da estação de crescimento, contudo, no período úmido, o desempenho no modelo com a FE foi mais fraco. Verma et al. (2015) verificaram que a inclusão da FE resultou em melhorias significativas nas previsões de vários sítios estudados, enquanto outros tiveram uma diminuição da qualidade das previsões. Então, os autores concluíram que em geral, no nível do bioma, a melhoria do desempenho foi insignificante. As melhorias provocadas pela inserção da FE ocorreram porque a mesma é fortemente influenciada pela umidade do solo na zona de enraizamento, que é um fator limitante que influencia no fluxo de calor latente (KURC e SMALL, 2004). Além disso, a umidade do solo regula a FE através de sua influência na condutância estomática (BALDOCCHI et al., 2004). Gilabert et al. (2015) aponta a falta de parametrização do estresse hídrico do algoritmo MOD17 é responsável por não restringir a LUE em anos ou períodos secos, levando a uma superestimativa nos dados. Sendo assim, o algoritmo

MODIS-GPP fornece, mais ou menos, as mesmas estimativas tanto em anos secos quanto úmidos (GELYBÓ et al., 2013).

Figura 15- Regressão linear entre a produção primária bruta derivada do método de vórtices turbulentos com a GPP modificada (GPP_{otm_local} , GPP_{otm_evi} e GPP_{otm_fapar}) para área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).



A utilização do EVI na estimativa da GPP também tem mostrado bons resultados em outros estudos. Segundo Rahman et al. (2005) o EVI pode fornecer estimativas razoavelmente

precisas de GPP. Sims et al. (2006) concluíram ainda que as relações do EVI com a GPP_{ec} são melhores do que aquelas com o MODIS-GPP, quando foram excluídos os dados do período do inverno onde a atividade fotossintética da vegetação é inativa. Huete et al. (2006), em estudo na região amazônica, observaram uma relação linear consistente entre o MODIS-EVI e a GPP_{ec} tanto em área de floresta primária como em uma pastagem, de tal forma que o MODIS-EVI não saturou as altas densidades de folhagem das florestas tropicais úmidas. Em locais de florestas escandinavas, Olofsson et al. (2008) relataram fortes correlações entre EVI e GPP, enquanto o NDVI exibiu saturação em áreas com alta densidade de folhagem, enquanto Sjostrom et al. (2011) constataram que o EVI capturou a dinâmica sazonal da GPP_{ec} melhor do que a GPP_{mod} . Ma et al. (2013) também observaram uma boa convergência entre o MODIS EVI e a GPP_{ec} em savanas do norte da Austrália, confirmando o potencial de relacionar essas duas fontes independentes de observações para melhor compreensão da dinâmica da assimilação de carbono da savana. Nossos resultados também indicaram uma relação mais forte do EVI com a GPP_{ec} , em relação a GPP_{mod} ($r^2 = 0,55$, conforme a Tabela 3).

Liu et al. (2011) compararam o desempenho de dois algoritmos de estimativa da GPP, o MODIS-GPP e o Modelo de Fotossíntese da Vegetação (VPM), em um ecossistema de pastagem semiárida. Os autores realizaram várias estimativas modificando a forma de cálculo do fAPAR, e verificaram que o algoritmo MOD17 teve melhores relações com a GPP_{ec} quando calculado usando o fAPAR_{evi}. A relação entre a GPP-VPM e GPP_{ec} também foi mais forte com a utilização do EVI e do NDVI no cálculo do fAPAR. Além disso, a GPP com fAPAR_{evi} subestimou os valores de GPP, enquanto os demais cálculos produziram superestimativas significativas.

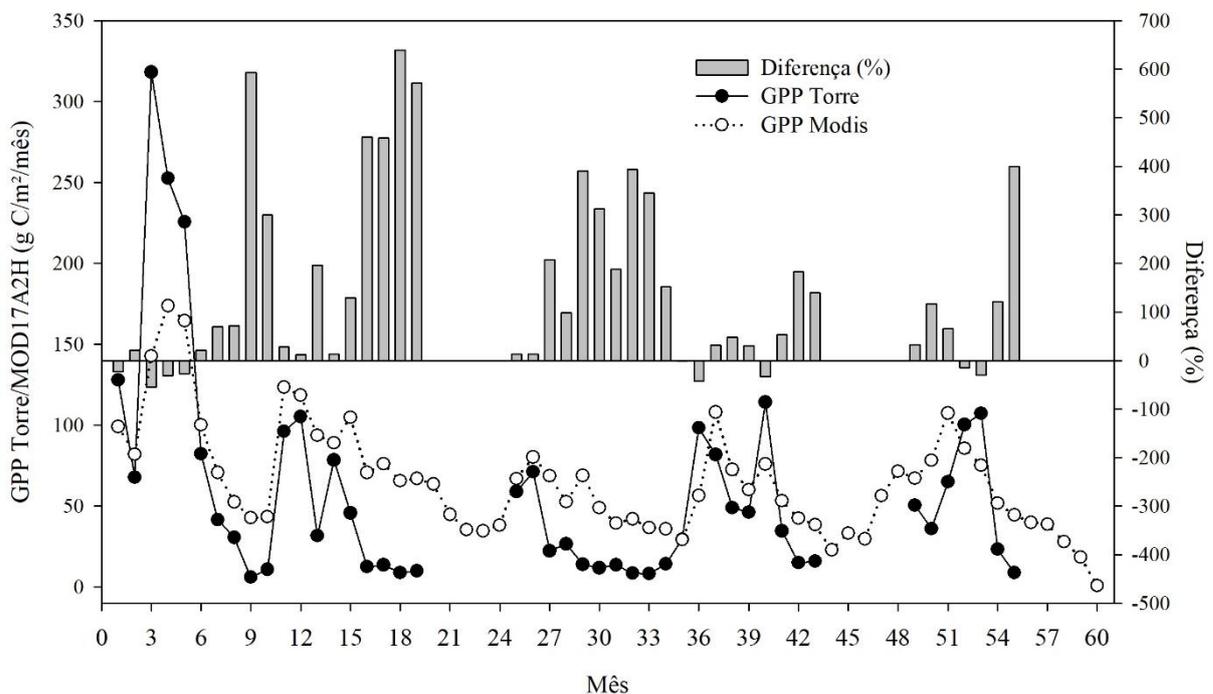
4.1.4 Variabilidade mensal da GPP

A variação mensal da GPP da área de caatinga preservada para os anos de 2011 a 2015 apresentou o mesmo comportamento sazonal dos dados em escala de oito dias (Figura 16). Porém, houve uma redução do erro relativo (%) da estimativa da GPP_{mod} em relação aos dados observados. O algoritmo MOD17 continuou subestimando os valores de GPP para o período com maior ocorrência de chuvas, como no ano de 2011, e superestimando a GPP para o período seco (Figura 16). A média mensal da GPP_{mod} para o período de 2011 a 2015 foi de $74,89 \pm 35,05$ g C m⁻² mês⁻¹ e a GPP_{ec} apresentou uma média de $59,86 \pm 66,22$ g C m⁻² mês⁻¹. Assim como nos dados de 8 dias, a GPP_{mod} média mensal foi maior do que a observada, como consequência dos valores bem mais elevados durante a estação seca. Constata-se, ainda, que a amplitude da

variação da GPP_{mod} mensal é menor, refletindo, talvez, uma limitação do algoritmo MODIS em estimar com precisão a GPP em períodos de déficit hídrico prolongado.

A GPP_{mod} máxima foi observada em abril de 2011 ($173,8 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$) e a mínima em novembro de 2015 ($18,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$), enquanto a GPP_{ec} registrou máxima em março de 2011 ($318 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$) e mínima em setembro do mesmo ano ($6,2 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$). É importante ressaltar que os anos de 2012, 2014 e 2015 apresentaram falhas nos últimos meses do ano, que provavelmente apresentariam valores mais baixos de GPP_{ec} (de acordo com o padrão de decréscimo da GPP nesse período e pela não ocorrência precipitação).

Figura 16- Variação mensal da produção primária bruta derivada do MODIS e pelo método de covariância de vórtices turbulentos e a diferença percentual, para a área de caatinga preservada, referentes ao período de 2011 a 2015.



Além de menores erros percentuais, a comparação entre a GPP_{mod} e GPP_{ec} mensais apresentou um coeficiente de determinação mais elevado ($r^2 = 0,68$), com significância estatística ($p < 0,05$) (Figura 17). Apesar da melhora nos coeficientes da regressão, os resíduos dos valores previstos pelo modelo continuaram apresentando heterocedasticidade, violando a premissa de independência dos resíduos. O teste de Durbin-Watson teve um valor de 1,362, abaixo do limite inferior (1,4754), evidenciando uma autocorrelação positiva dos erros (Figura 18).

Figura 17- Regressão linear entre a produção primária bruta derivada do produto MOD17A2H e medida pelo método de vórtices turbulentos para área de caatinga preservada, em escala mensal, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).

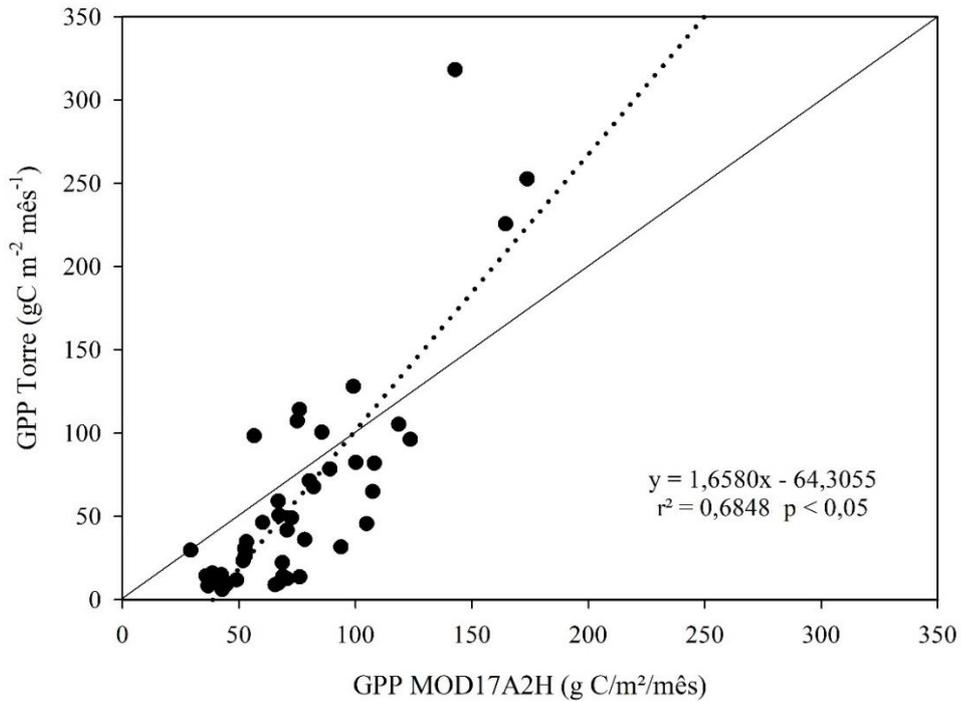
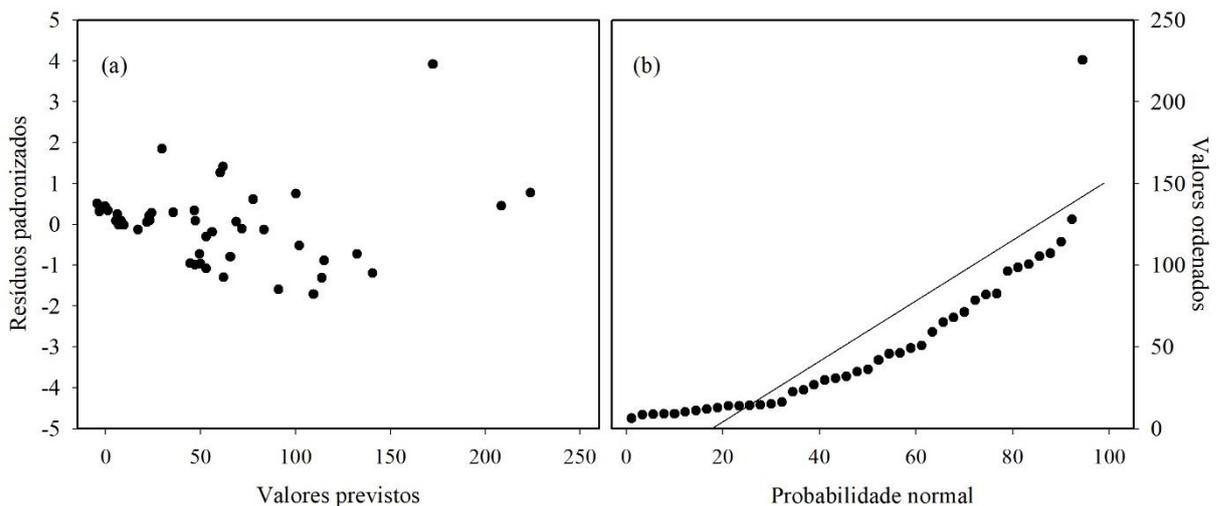


Tabela 4. Resultados do teste ANOVA para a regressão linear simples entre a GPP derivada do MODIS e a GPP observada mensais, como nível de significância de 0,05.

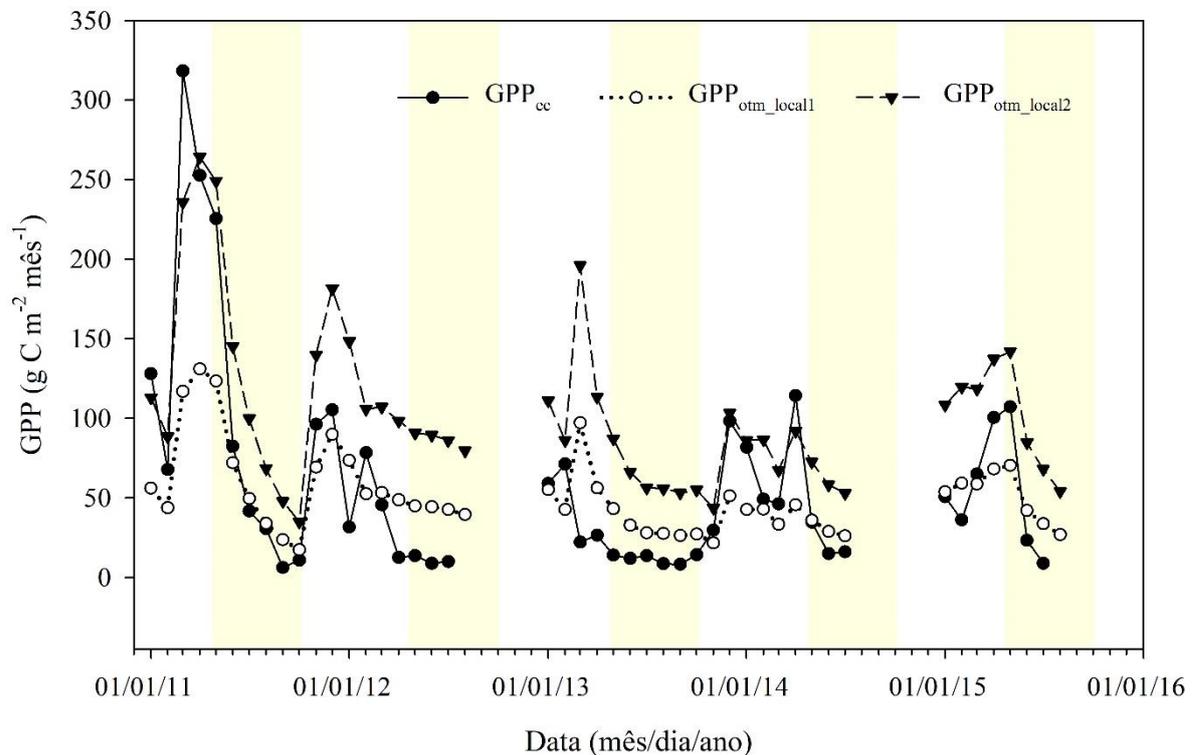
	Soma dos Resíduos	Graus de liberdade	Média dos Resíduos	F	Sig.
Regressão	132125,967	1	132125,967	93,424	< 0,0001
Resíduo	60813,348	43	1414,264		
Total	192939,315	44			

Figura 18- Relação entre os resíduos padronizados e os valores de GPP previstos pela equação de regressão (a) e probabilidade normal dos valores previstos ordenados (b).



No que se refere a variação mensal da GPP recalculada com algumas modificações no algoritmo MOD17, verificou-se que a GPP_{otm_local} mensal apresentou um desempenho mais fraco em relação à estimativa GPP_{mod} ($r^2 = 0,655$; $p < 0,05$; $REQM\ GPP_{otm_local1} = 47,8\ g\ C\ m^{-2}\ mês^{-1}$ e $REQM\ GPP_{otm_local2} = 59,2\ g\ C\ m^{-2}\ mês^{-1}$). Em alguns meses foi possível observar certa relação entre a GPP_{otm_local} e a GPP_{ec} , principalmente no ano de 2011. No geral houve uma superestimativa da GPP_{otm_local} , sobretudo no período seco, evidenciando que mesmo com o uso do déficit de pressão de vapor medido na torre, essa variável não foi eficaz em representar com precisão a GPP mensal na estação seca, assim como constatado para a GPP_{otm_local} de 8 dias. A GPP_{otm_local2} registrou valores próximos da GPP_{ec} no início do ano de 2011, mas foi responsável por produzir as maiores superestimativas durante os meses mais seco (Figura 19).

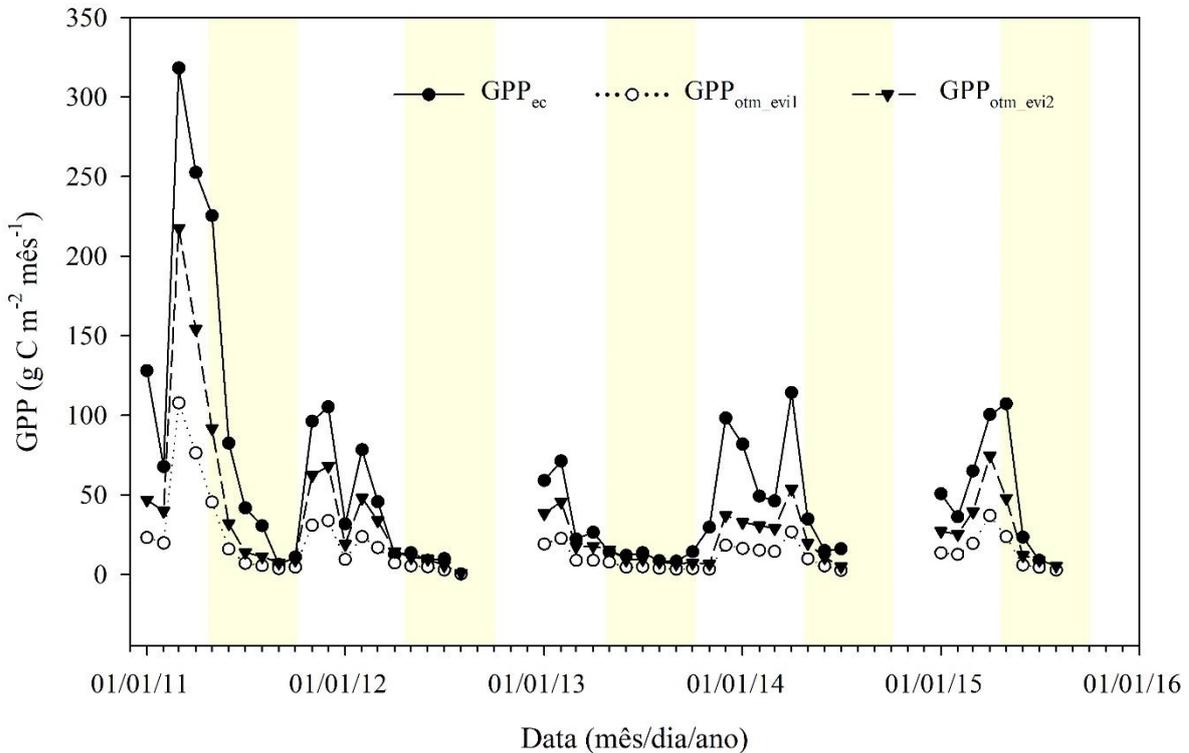
Figura 19- Variação mensal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado usando dados meteorológicos locais, para área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.



A GPP_{otm_evi} esteve mais associada a variação da GPP_{ec} mensal, apresentando uma forte correlação entre ambas ($r^2 = 0,92$; $p < 0,0001$; $REQM\ GPP_{otm_evi1} = 63,9\ g\ C\ m^{-2}\ mês^{-1}$ e $REQM\ GPP_{otm_evi2} = 39,7\ g\ C\ m^{-2}\ mês^{-1}$). Apesar de uma melhor correlação, a GPP_{otm_evi} subestimou os valores de GPP ao longo dos anos de 2011 a 2015, nos dois cálculos realizados. O erro da estimativa foi menor na GPP_{otm_evi2} , calculada com ϵ_{max} de $2,5\ g\ C\ MJ^{-1}$. A GPP_{otm_evi1} mensal

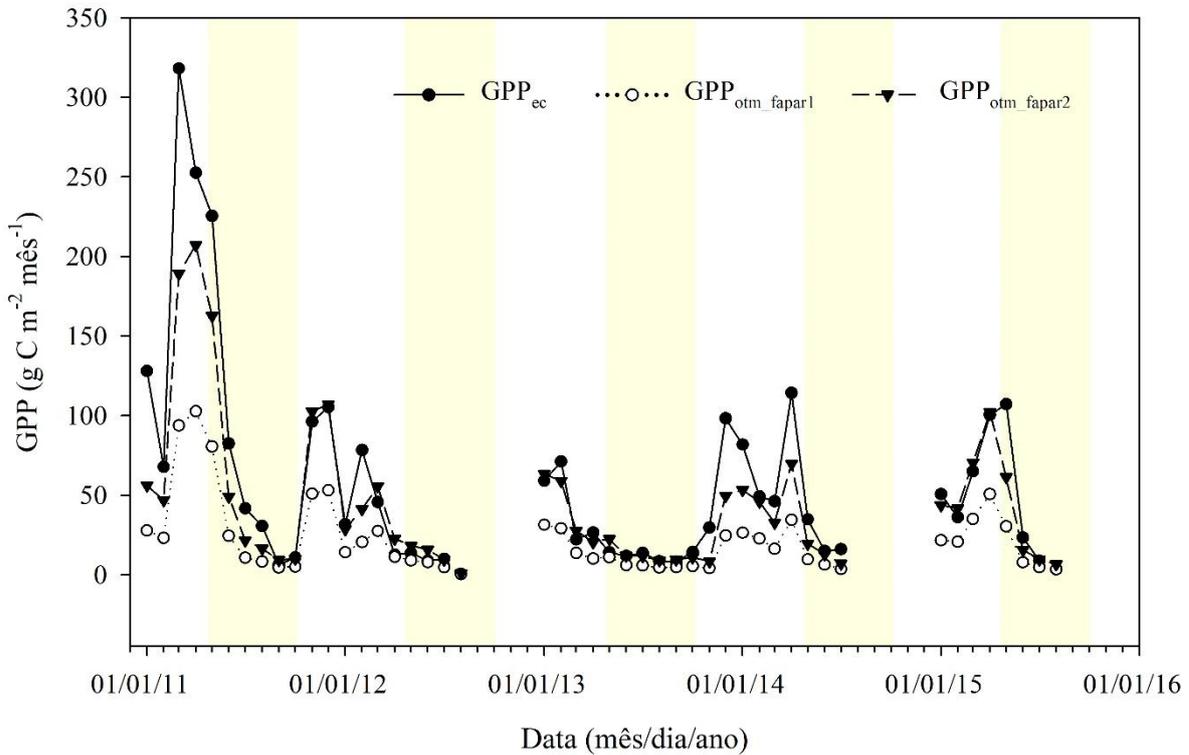
apresentou média de $16,2 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, enquanto a $\text{GPP}_{\text{otm_evi2}}$ registrou valor médio de $32,7 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ (Figura 20).

Figura 20- Variação mensal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado usando dados de PAR local, EVI e fração evaporativa, para área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.



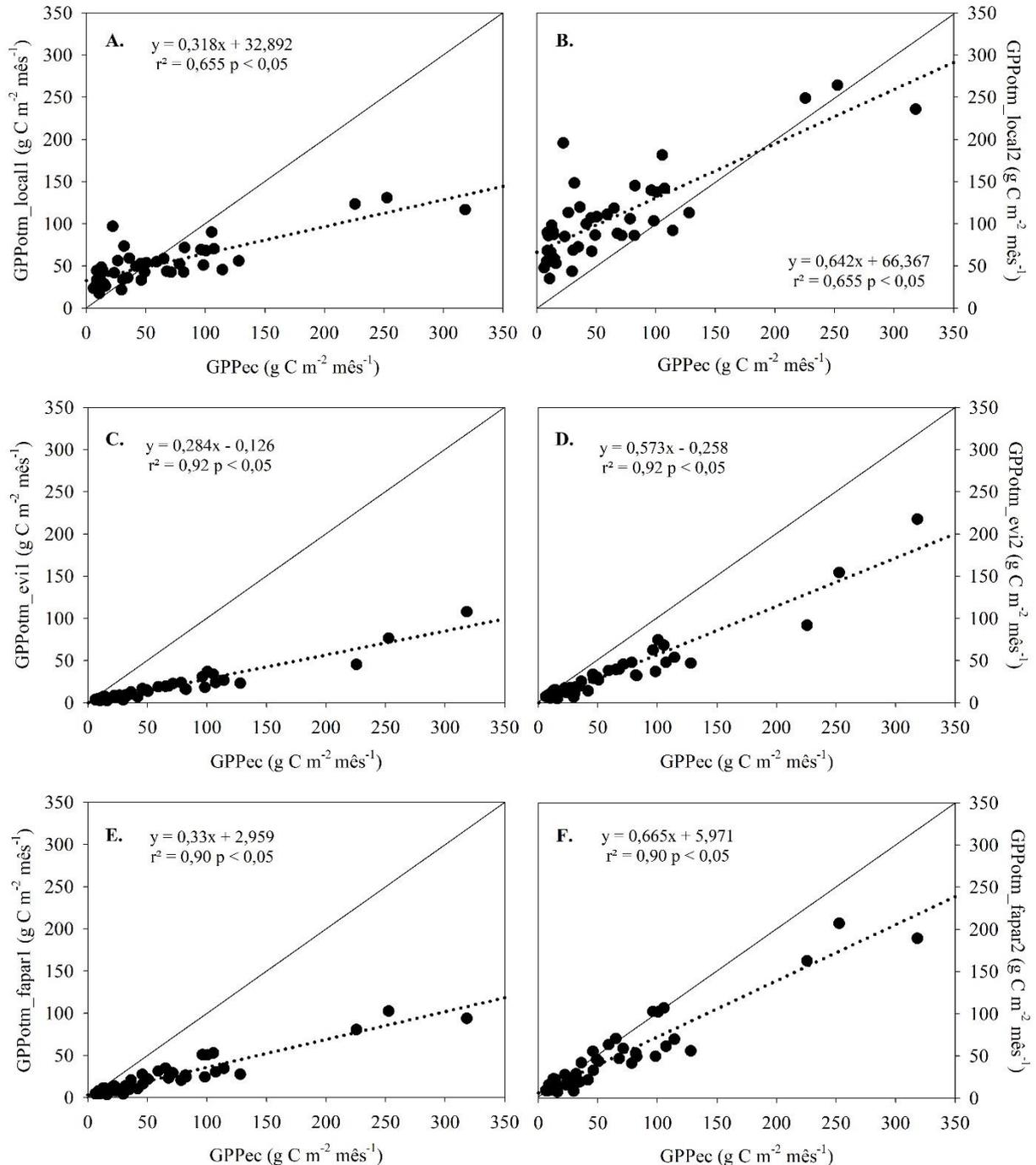
A estimativa de GPP mensal utilizando o $\text{fAPAR}_{\text{mod15}}$ e a fração evaporativa apresentou erros mais baixos, quando comparada com as demais. Além disso, também houve uma forte correlação entre $\text{GPP}_{\text{otm_fapar}}$ e GPP_{ec} mensais ($r^2 = 0,90$; $p < 0,0001$; $\text{REQM } \text{GPP}_{\text{otm_fapar1}} = 57,96 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ e $\text{REQM } \text{GPP}_{\text{otm_fapar2}} = 29,96 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$). Ao longo do período entre 2011 e 2015, a $\text{GPP}_{\text{otm_fapar1}}$ registrou média de $21,8 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ e a $\text{GPP}_{\text{otm_fapar2}}$ com média de $44 \text{ g C m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Em alguns meses inseridos na estação chuvosa observou-se que a $\text{GPP}_{\text{otm_fapar}}$ apresentou um retardo na resposta da assimilação de carbono. Em 2011, por exemplo, a GPP_{ec} máxima foi registrada em março, enquanto a $\text{GPP}_{\text{otm_fapar}}$ máxima ocorreu em abril. Em 2013 e 2015, por outro lado, a $\text{GPP}_{\text{otm_fapar}}$ máxima antecipou em um mês a GPP_{ec} mensal mais alta (Figura 21).

Figura 21- Variação mensal da produção primária bruta derivada do algoritmo MODIS modificado usando dados de PAR local, $fAPAR_{mod15}$ e fração evaporativa, para área de Caatinga preservada, durante o período de 2011 a 2015.



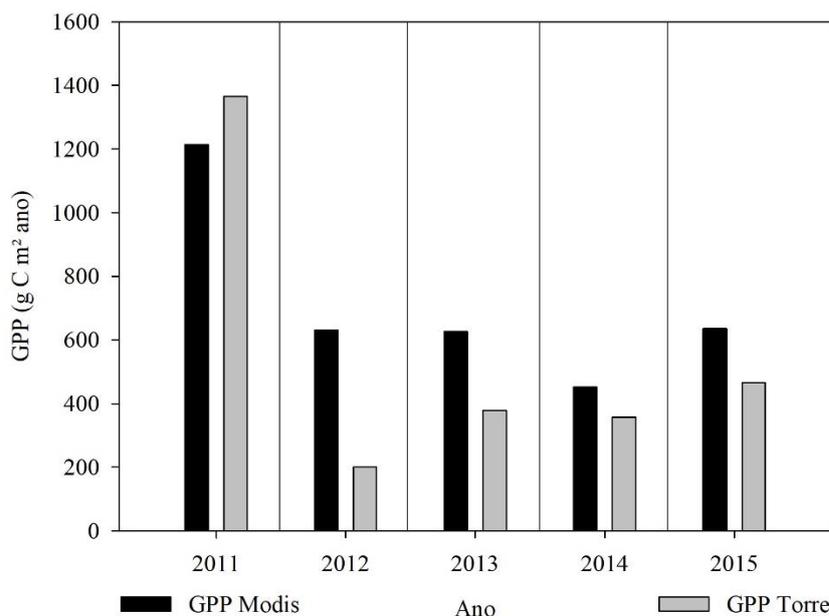
As estimativas de GPP mensal com o algoritmo MODIS-GPP modificado evidenciam a mesma tendência verificada nos dados de 8 dias. A inserção da fração evaporativa melhora substancialmente a capacidade do algoritmo em representar a sazonalidade esperada da assimilação de carbono pela Caatinga, acompanhando a variabilidade da precipitação e os padrões fenológicos da vegetação. Quando se compara a regressão entre a GPP_{ec} e as estimativas de GPP_{otm} mensais com os dados de 8 dias, verifica-se que o algoritmo responde melhor a variação mensal dos dados, o que pode estar relacionado com a redução dos ruídos presentes na GPP-8dias. A GPP_{otm_local}, por exemplo, tem uma melhoria significativa na correlação com a GPP_{ec} em escala mensal ($r^2 = 0,655$ /mensal e $r^2 = 0,31$ /dia).

Figura 22- Regressão linear entre a produção primária bruta mensal derivada do método de vórtices turbulentos com a GPP-MODIS modificada (GPP_{otm_local} , GPP_{otm_evi} e GPP_{otm_fapar}) para área de caatinga preservada, para o período de 2011 a 2015. São mostradas a linha de regressão (pontilhada) e a linha 1:1 (sólida).



Alguns estudos analisam a variação da GPP em escala anual, o que diminui as incertezas acerca das estimativas de GPP. De fato, no ano de 2011, por exemplo, a soma anual da GPP_{mod} apresentou um leve viés negativo em relação aos dados medidos por vórtices turbulentos. Nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015 o viés foi positivo, com o ano de 2012 registrando a maior diferença percentual entre GPP_{mod} e GPP_{ec} (Figura 23).

Figura 23- Comparação entre a GPP-MODIS e GPP-Torre para os anos de 2011 a 2015, referente a área de caatinga preservada localizada no município de Petrolina, Pernambuco, Brasil.



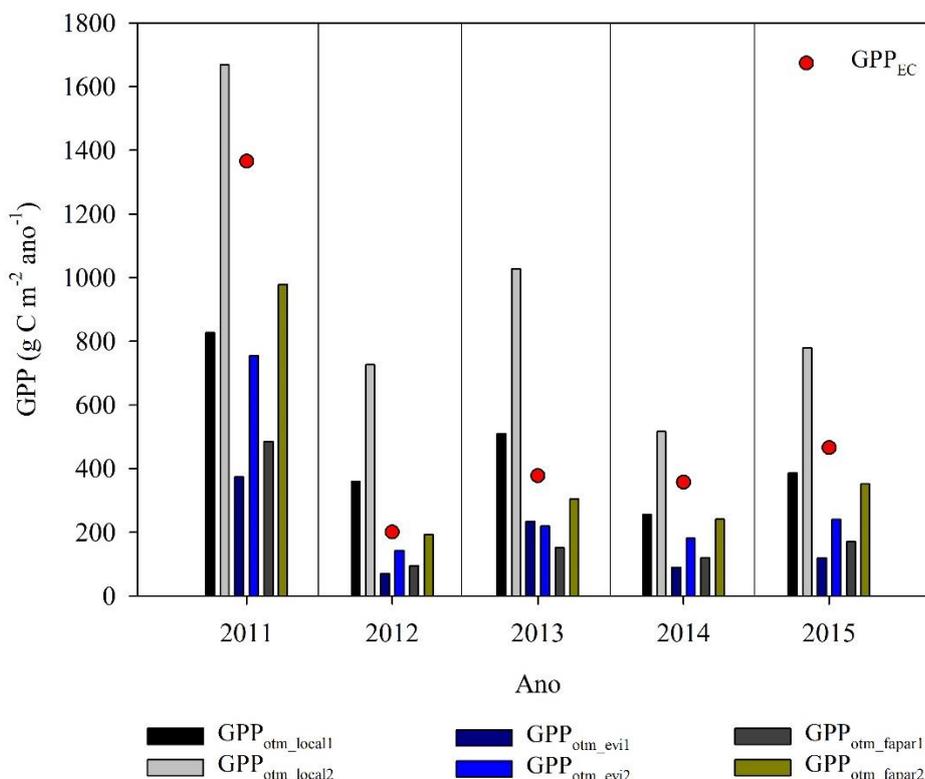
No ano de 2011, quando a precipitação esteve próxima à média histórica, a diferença entre a GPP_{mod} e a GPP_{ec} anuais foi de 12,4%, enquanto nos demais anos essa diferença foi mais elevada. Em 2013, que também não apresentou falhas na série, a diferença entre a GPP_{mod} e GPP_{ec} foi de 39,68%. O ano de 2012 foi o que apresentou maior diferença percentual entre a GPP_{mod} e GPP_{ec} , coincidindo com o fato deste ano ter sido extremamente seco (MORAIS et al., 2016; SOUZA et al., 2015).

Apesar da ocorrência de falhas na série da GPP_{ec} , nos anos de 2012, 2014 e 2015, notou-se que as diferenças percentuais entre os dados do MOD17 e de vórtices turbulentos foram menores, quando comparadas com a relação entre os valores de oito dias e mensal. Isto ocorre devido a uma compensação das imprecisões do algoritmo MODIS-GPP para a vegetação de Caatinga. A superestimativa do período seco foi compensada, em geral, por uma subestimativa da GPP_{mod} do período chuvoso. Essa compensação pode ser justificada, ainda, pela diferença percentual mais elevada entre GPP_{mod} e GPP_{ec} em anos mais secos, onde o período de déficit hídrico prolongado fez com que a GPP_{mod} superestimasse ao longo de praticamente todo o ano, aumentando, portanto, os erros.

As estimativas de GPP otimizadas em escala anual apresentaram diferenças de acordo com o tipo de modificação que foi realizada no algoritmo MOD17 (Figura 24). A GPP_{otm_local2} anual sobrestimou os valores de GPP para todos os anos analisados, enquanto que a GPP_{otm_local1} subestimou a GPP nos anos de 2011, 2014 e 2015. Além disso, nesses dois últimos anos (2014 e 2015) a GPP_{otm_local1} foi a que mais se aproximou da GPP_{ec} anual, com diferenças de -28,4%

e -17,1%, respectivamente. Contudo, a GPP_{otm_fapar2} foi, de maneira geral, a que mostrou melhores resultados. No ano de 2012, mais seco da série, a diferença entre a GPP_{otm_fapar2} e GPP_{ec} anual foi de apenas -4,2%, enquanto em 2013 a diferença foi de -19,4%. As duas estimativas de GPP_{otm_evi} subestimaram os valores de GPP em todos os anos.

Figura 24- Comparação entre a GPP modificada e GPP torre em escala anual, para o período de 2011 a 2015, referente à área de caatinga preservada localizada no município de Petrolina, Pernambuco, Brasil.

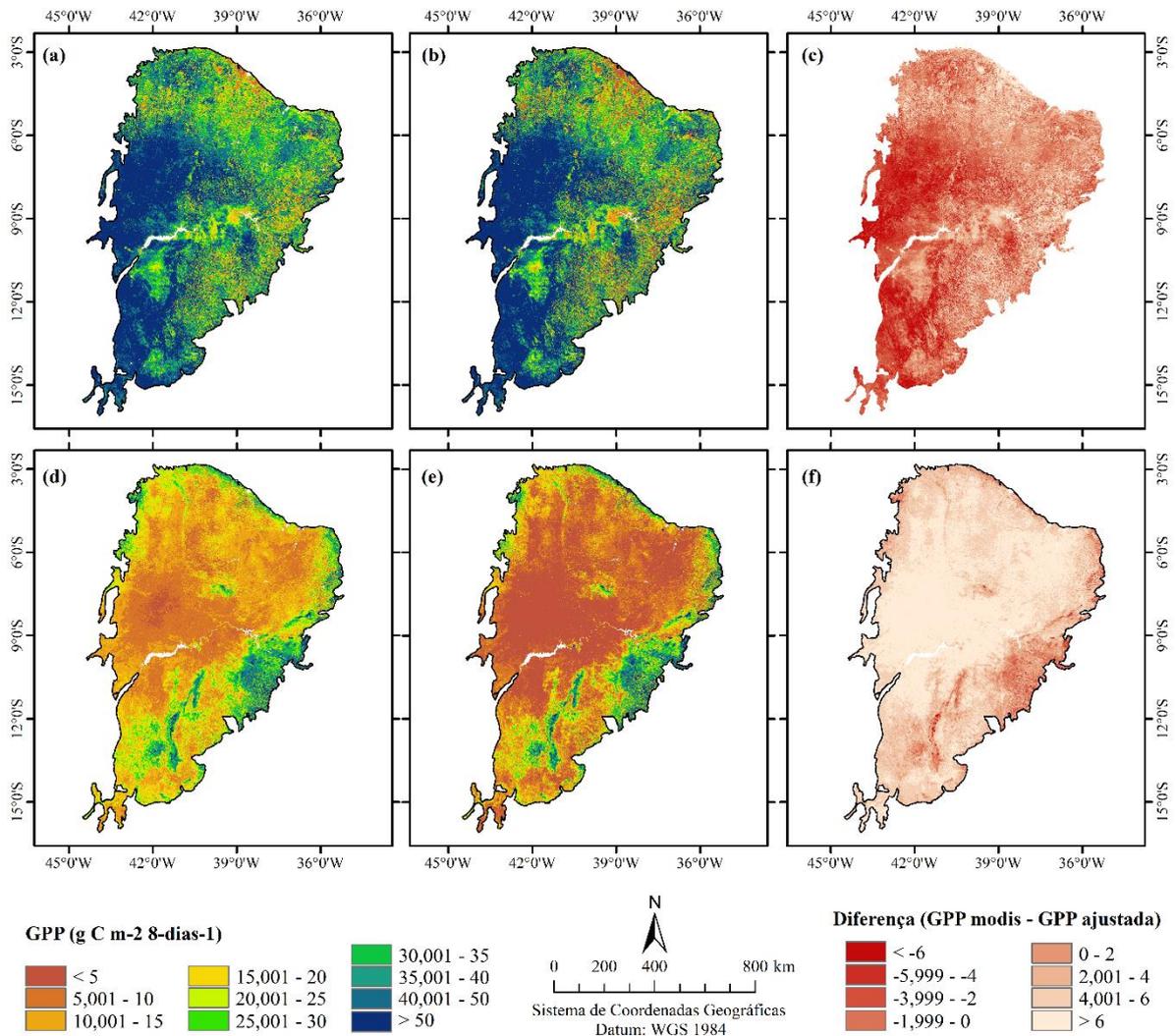


Os resultados expostos acima evidenciam, primeiramente, que a GPP_{mod} anual apresentou bons resultados em anos em que a precipitação esteve mais próxima à normalidade. No que se refere as estimativas com modificações no algoritmo MODIS-GPP, a inserção da fração evaporativa reduziu os valores de GPP ao longo do período seco, mas não melhorou a precisão das estimativas no período chuvoso. Na escala anual, é importante prover melhorias no algoritmo que sejam eficientes ao longo de todo ano, o que torna o desafio ainda maior. As incertezas e imprecisões encontradas nas estimativas de GPP_{mod} são produtos de vários parâmetros de entrada, logo a inserção de um parâmetro que melhore a estimativa na estação seca (como a FE) deve vir acompanhada de uma outra modificação para resolver o problema da subestimação nos períodos úmidos. Sendo assim, vimos que a GPP_{otm_fapar} apresentou valores mais elevados para o período chuvoso, quando comparada com a GPP_{otm_evi} , e que a utilização da LUE_{max} de 2,5 g C MJ contribuiu para um aumento ainda maior nos valores de GPP.

4.1.5 Desempenho do modelo de ajuste da GPP para o bioma Caatinga

O modelo obtido a partir da regressão entre os dados de GPP_{mod} e GPP_{ec} foi utilizado para ajustar os valores de GPP derivado do algoritmo MODIS para todo bioma caatinga. Sendo assim, foram utilizadas duas imagens, referentes aos dias 23/04/2011 e 24/10/2011, que correspondem ao período chuvoso e seco na maior parte da região (Figura 25). O desempenho do modelo de regressão também foi analisado para os dados mensais, com imagens de março de 2015 e agosto de 2012.

Figura 25- GPP derivada do MODIS (a e d), GPP ajustada a partir de modelo de regressão (b e e) e diferença (c e f) entre ambas para os dias 113 de 2011 (a, b, c) e 297 de 2013 (d, e, f).

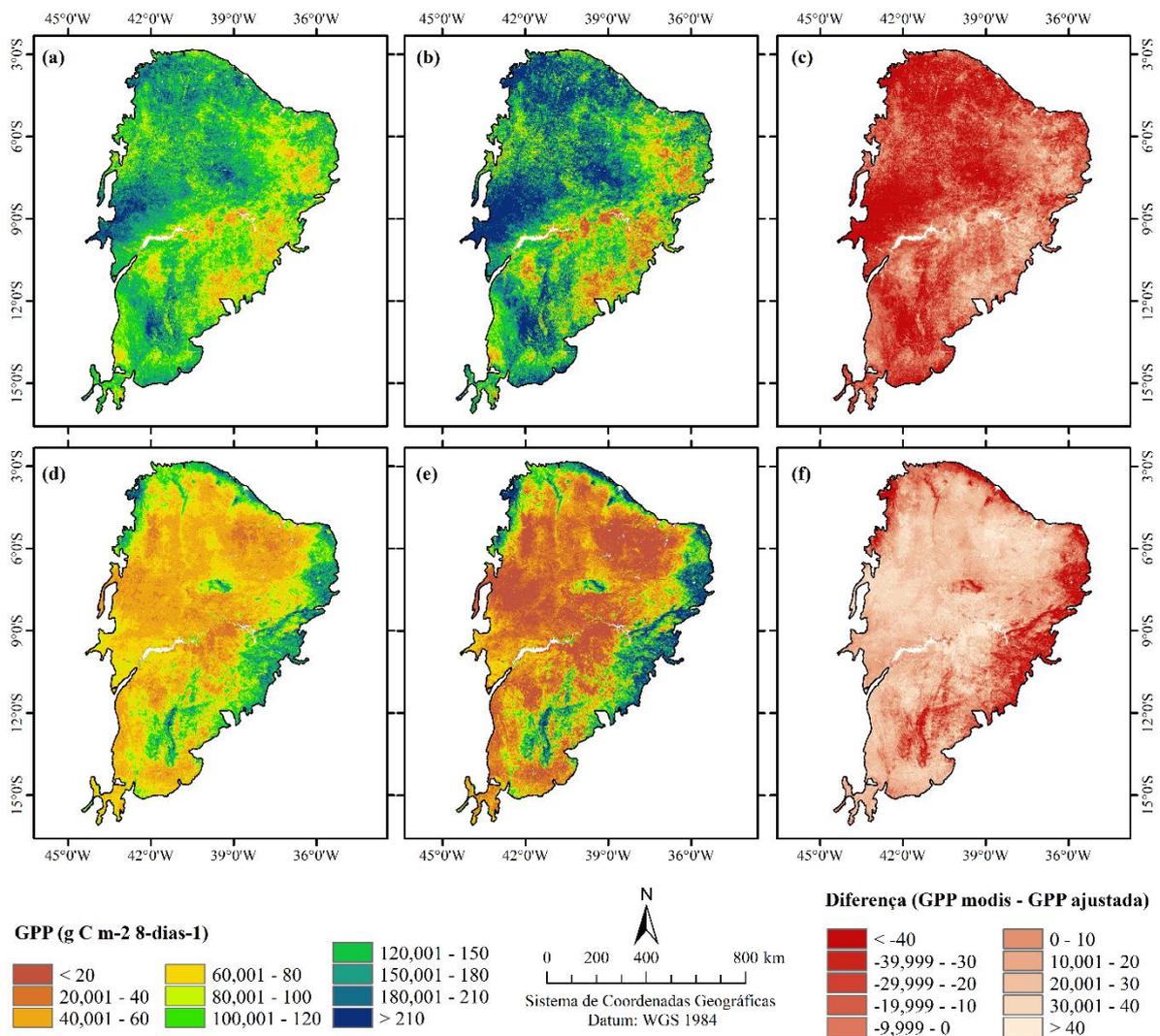


A comparação entre a GPP_{mod} e GPP_{ec} mostrou que os maiores erros na estimativa da GPP_{mod} ocorreram nos períodos com maior deficiência hídrica. Sendo assim, a aplicação do modelo para o ajuste da GPP_{mod} mostra que durante o período chuvoso o ajuste do modelo

aumentou os valores de GPP, sobretudo nas áreas que já possuíam GPP elevada. Em contrapartida, na imagem do período seco percebe-se melhor o desempenho do modelo para GPP mais baixa. Nesse dia, verificou-se que a GPP ajustada apresentou valores inferiores aos registrados pela GPP_{mod} .

O comportamento espacial da GPP ajustada mensal também apresentou a mesma tendência dos dados de oito dias. Na Figura 11 nota-se que houve um aumento da GPP para áreas que apresentavam valores entre 100 e 210 g C m² mês. As áreas que tinham GPP_{mod} inferior a 80 g C m² mês registraram uma redução nos valores após a aplicação do modelo, apresentando GPP inferior a 20 g C m² mês (Figura 26).

Figura 26- GPP derivada do MODIS (a e d), GPP ajustada a partir de modelo de regressão (b e e) e diferença (c e f) entre ambas para o mês de março de 2015 (a, b, c) e agosto de 2012 (d, e, f).

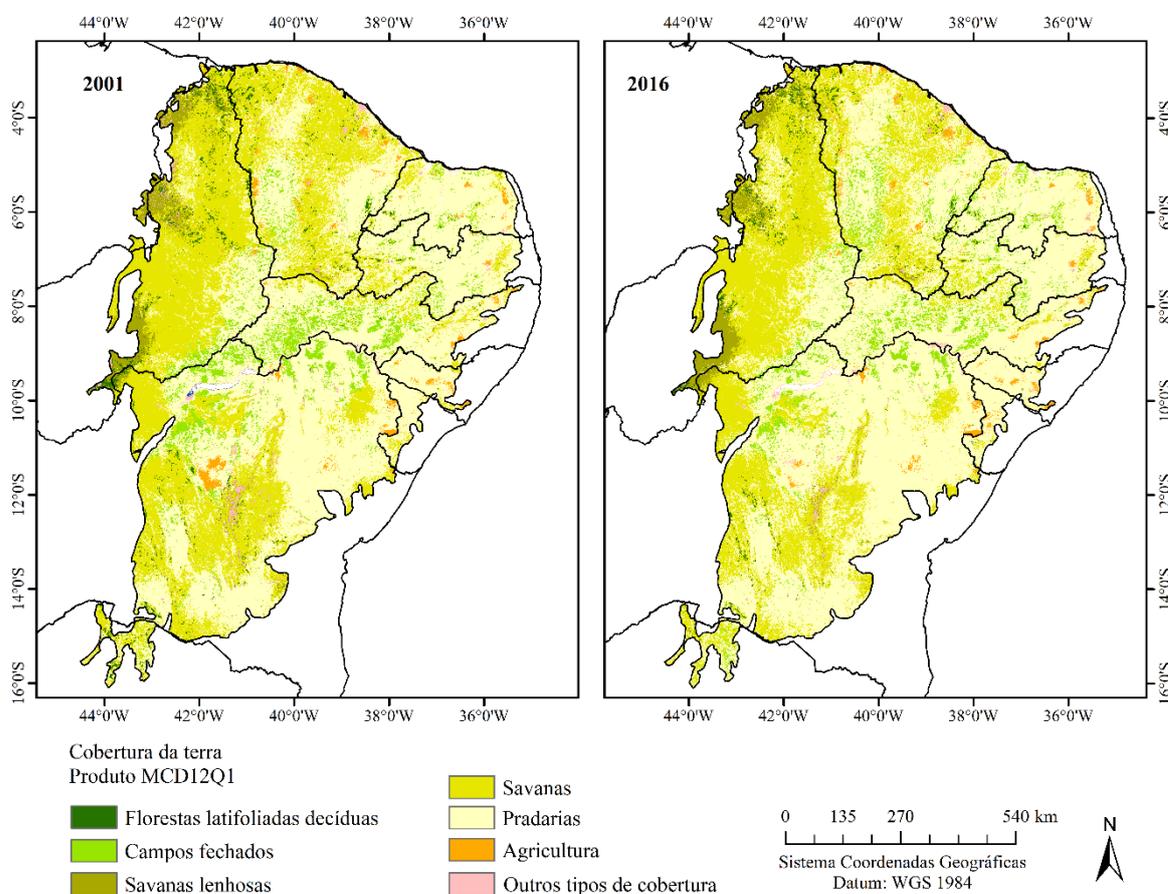


4.2. Influência de fatores ambientais e antrópicos na variabilidade espacial e temporal da produção primária da Floresta Tropical Sazonalmente Seca de Caatinga

4.2.1 Cobertura da terra

O produto de cobertura da terra derivado do MODIS foi utilizado para avaliar as mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra do domínio da Caatinga, entre os anos de 2001 e 2016. Das 14 classes presentes na classificação de cobertura da terra da Universidade de Maryland (UMD), apenas seis representam mais de 98% da área total, sendo elas: florestas latifoliadas decíduas, campos fechados, savanas lenhosas, savanas, pradarias e agricultura (Figura 27).

Figura 27- Classificação do uso e cobertura da terra no bioma Caatinga, para os anos de 2001 e 2016, derivada do produto MCD12Q1 (versão 6) do sensor MODIS, com 500 metros de resolução espacial.



Ao longo do período entre 2001 e 2016 não houve grandes mudanças no uso e cobertura da terra do ecossistema Caatinga, mas cabe destacar alguns aspectos relevantes. Primeiramente,

a cobertura classificada com Pradaria (ou pastagem) apresentou a maior expansão dentro do período analisado, com crescimento de 14,6%. Por outro lado, houve uma redução das áreas de Savanas e, em menor proporção, das Florestas latifoliadas decíduas (Tabela 5). As áreas de florestas latifoliadas estão restritas à porção oeste da Caatinga, numa transição com o Cerrado, onde o clima é mais úmido.

Tabela 5. Percentual das classes de uso e cobertura da terra para o bioma Caatinga, de acordo com o produto MCD12Q1 (versão 6).

Ano	Classes de uso e cobertura da terra (%)						
	Florestas latifoliadas decíduas	Campos fechados	Savanas lenhosas	Savanas	Pradarias	Agricultura	Outros usos
2001	1,56	5,61	2,73	34,85	52,73	1,27	1,25
2002	1,70	5,60	2,78	34,82	52,57	1,30	1,30
2003	1,84	5,65	2,85	34,43	52,74	1,26	1,26
2004	2,40	5,58	2,93	34,16	52,47	1,26	1,26
2005	2,76	5,60	2,96	33,63	52,60	1,27	1,27
2006	2,74	5,54	2,95	33,53	52,80	1,27	1,27
2007	2,79	5,49	2,89	33,56	52,89	1,22	1,22
2008	3,03	5,26	2,85	33,70	52,90	1,14	1,14
2009	3,00	5,00	2,80	34,11	52,85	1,14	1,14
2010	2,48	4,82	2,73	34,25	53,74	0,92	0,92
2011	1,92	4,56	2,70	34,38	54,58	0,87	0,87
2012	1,00	4,66	2,60	33,12	56,91	0,82	0,82
2013	0,97	4,70	2,58	31,92	58,03	0,92	0,92
2014	1,00	4,89	2,63	30,90	58,90	1,02	1,02
2015	1,02	5,21	2,98	29,42	59,64	1,10	1,10
2016	0,99	5,42	2,70	28,40	60,41	1,13	1,13

Schulz et al. (2017) verificaram a mudança da cobertura da terra na Caatinga por meio de produtos MODIS e caracterizaram as áreas classificadas como pastagens por baixas quantidades de vegetação lenhosa e alta transformação humana. Além disso, os autores associaram as áreas de savanas e savanas lenhosas (MCD12) com dois tipos de florestas secas de caatinga com cobertura vegetal densa e alta, enquanto as classes de arbustos fechados e

abertos foram interpretadas como espinhos xerofíticos ou florestas secas degradadas de Caatinga com cobertura vegetal menos densa e mais baixa.

De acordo com o manual do produto MCD12 as áreas classificadas como pastagens/pradarias são dominadas por plantas herbáceas anuais (< 2m), enquanto savanas e sanvans lenhosas diferem apenas quanto ao percentual de cobertura de árvores (dossel > 2m), variando de 10-30% e 30-60%, respectivamente. Campos fechados correspondem a uma cobertura dominada por plantas lenhosas perenes (1-2m de altura) em mais de 60% da área e Campos abertos são dominados por plantas lenhosas perenes com mesma altura da classe anterior, porém com cobertura de 10 a 60% da área (SULLA-MENASHE e FRIEDL, 2018)

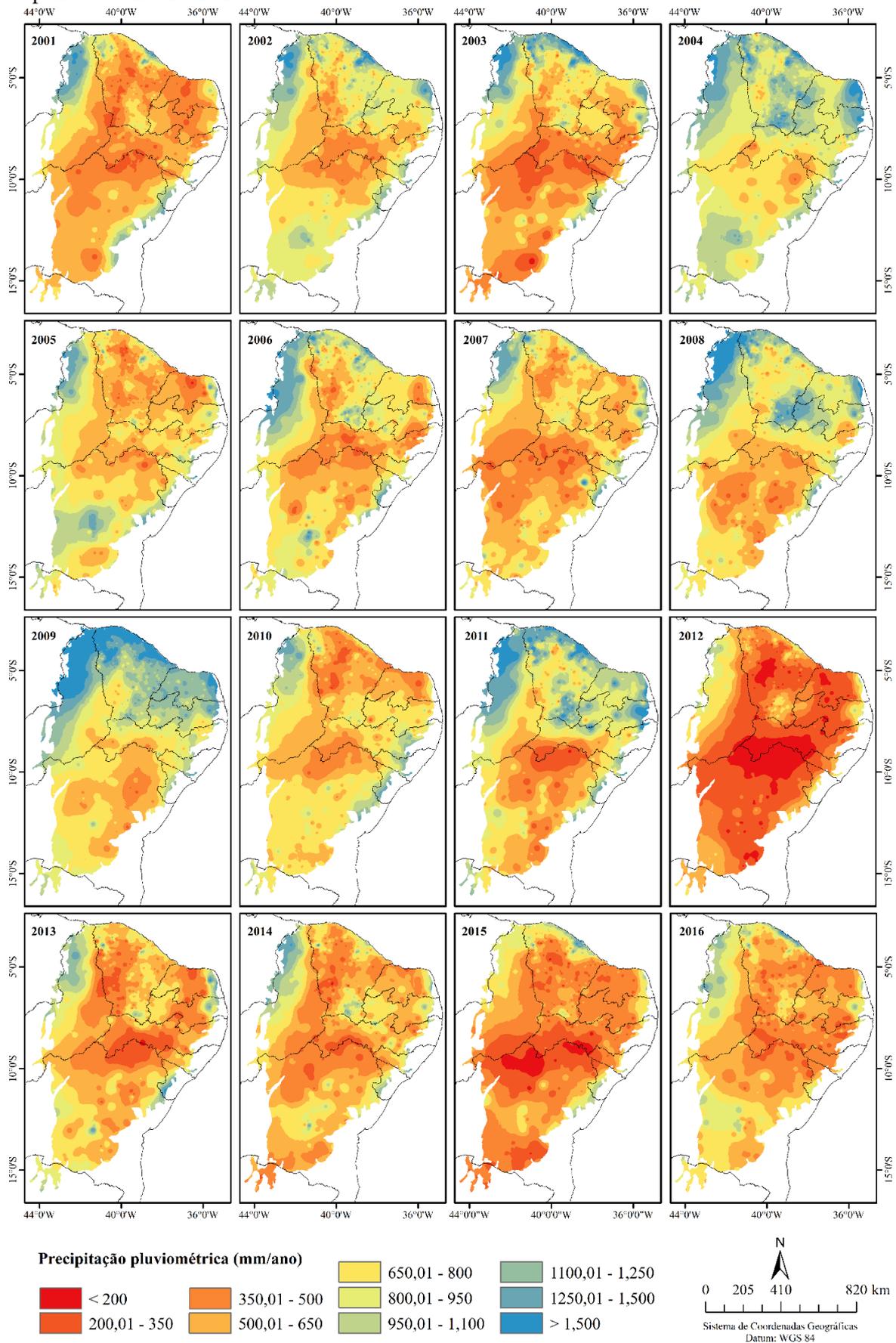
4.2.2 Variação interanual da precipitação pluviométrica da área de abrangência da Caatinga

O bioma Caatinga encontra-se associado a região semiárida brasileira e, por isso, as espécies vegetais possuem adaptações e comportamento fenológico associado a dinâmica sazonal da precipitação. Essa variável, que influencia na redução da disponibilidade de água no solo, tem papel fundamental nos padrões de assimilação de carbono pela vegetação, permitindo entender como a Caatinga responde as diferentes condições de estresse hídrico, sobretudo em um contexto de mudanças climáticas globais.

Durante o período de 2001 a 2016, a Caatinga apresentou um alta variabilidade espacial e temporal da precipitação (Figura 28). As áreas mais úmidas estão localizadas na porção noroeste e norte (entre os estados do Piauí e Ceará), bem como a leste (entre os estados do Rio Grande do Norte-Paraíba e Sergipe-Bahia). Nessas as áreas, a precipitação foi superior a 1250 mm, na maioria dos anos. Em contrapartida, as áreas mais secas estão localizadas no interior da Caatinga, principalmente nos estados de Pernambuco, norte da Bahia e oeste de Alagoas, com precipitação inferior a 500 mm ao ano.

Na variação interanual da precipitação, o ano de 2001 apresentou precipitação entre 350 e 650 mm na maior parte da área de Caatinga (72,7% da área total). O ano de 2004 foi, em geral, o mais úmido, com um pouco mais de 50% da área com precipitação entre 800 e 1100 mm. Além disso, outro destaque positivo, sobretudo no que se refere ao setor norte da Caatinga, corresponde aos anos de 2009 e 2011, onde foram registrados valores superiores a 950 e 800 mm, respectivamente.

Figura 28- Variação espacial e interanual da precipitação pluviométrica para o bioma Caatinga, referente ao período de 2001 a 2016.



Os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015 apresentaram precipitação mais baixa que os demais, principalmente em 2012, onde foram registrados valores inferiores a 200 mm em 14% da área (entre Pernambuco e Bahia) e entre 200 e 350 mm em 46,9% da Caatinga. Em 2013 e 2014, o acumulado de chuvas apresentou uma elevação na porção noroeste e no leste (entre os estados de Sergipe e Bahia), como precipitação superior a 1100 mm. Nas demais áreas, a precipitação também foi mais elevada em relação ao ano de 2012.

Ao longo do período estudado foi possível constatar uma alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, o que já era esperado para a região. As condições climáticas extremas são caracterizadas por variações anuais, interanuais e espaciais na precipitação, temperaturas elevadas e secas irregulares que desafiam o bem-estar humano na Caatinga. Os períodos severos de seca também afetam o crescimento das plantas e têm impacto social e econômico substancial sobre a população (RIBEIRO et al., 2016).

A força da variabilidade da precipitação no Nordeste brasileiro (NEB) em todas as escalas de tempo dependerá da localização e da magnitude das anomalias da Temperatura de Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Pacífico e Atlântico (NOBRE e CHUKLA, 1996; KAYANO e CAPISTRANO, 2013). Alguns fatores de variabilidade natural incluem o El Niño/Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e Oscilação Multidecadal Atlântica (AMO) (MARENGO et al., 2013; AMORIM et al., 2014; RODRIGUES e MCPHADEN, 2014).

Em relação à influência do ENOS na precipitação do bioma Caatinga, entre o período de 2001 a 2016 observou-se a ocorrência de quatro eventos de El Niño com diferentes intensidades (Moderado: 2002-03, 2006-07 e 2009-10; Muito forte: 2015-16) (INPE, 2018). Contudo, nem todos os anos mais secos estiveram associados à ocorrência de ENOS, devido à influência de outros fatores que influenciam as chuvas no NEB, como o Dipolo do Atlântico. Em 2012, uma seca severa desafiou ainda mais a região (MARENGO et al., 2016), se prolongando até o ano de 2017. Nas últimas décadas, estudos recentes revelaram relações estreitas entre as variabilidades da precipitação e a dinâmica da vegetação no NEB, o que poderia levar a uma degradação de larga escala no futuro (BARBOSA e KUMAR, 2016; MARENGO et al., 2016), pois condições persistentes de seca podem levar a uma diminuição gradual do nível de umidade do solo, resultando em atividade fotossintética mais fraca que o normal (Barbosa et al., 2015).

4.2.3 Variação espacial e temporal da produção primária bruta da Caatinga

A variação anual da produção primária bruta da vegetação de caatinga foi condicionada pela variabilidade da precipitação pluviométrica. Na Figura 29, é possível observar que em todos os anos, as áreas que apresentaram os maiores valores de GPP ($>2000 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) estão localizadas no noroeste, na transição com o Cerrado; ao sul do estado da Bahia, na região da Chapada Diamantina; na região mais ao centro, entre os estados de Pernambuco e do Ceará, onde se encontra a Chapada do Araripe. Nessas áreas, foram registrados valores de GPP acima de $2200 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, principalmente nos anos mais chuvosos.

Em contrapartida, os valores mais baixos de GPP foram observados na região próxima ao rio São Francisco, entre os estados de Pernambuco e Bahia, com GPP inferior a $600 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Essa classe de valores também foi registrada no oeste do estado do Rio Grande do Norte e da Bahia, com maior destaque nos anos de 2012, 2015 e 2016. Em relação ao comportamento temporal da GPP, constatou-se que em anos cuja precipitação esteve mais próxima da normalidade, a assimilação de carbono pela Caatinga registrou valores entre 1200 e 1600 g C m^{-2} na maior parte da área de estudo (2002 - 46,8%; 2004 - 50,4%; 2005 - 52,7%; 2006 - 52,1%; 2008 - 54,8%; 2010 - 48,7% da área total). Nos anos de 2009 e 2011, os valores de GPP foram, em geral, mais elevados, com predominância de valores entre 1400 e $200 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (60,4% e 58,6% da área total, respectivamente).

No que se refere a variação anual do GPP ajustada pelo modelo de regressão (Figura 30), notou-se que os padrões espacial e temporal são semelhantes ao apresentado pela GPP_{mod} . Entretanto, nas áreas de baixa produtividade primária, os valores de GPP foram reduzidos ainda mais, tendo ocorrido o oposto nas áreas mais úmidas de elevada produtividade. No ano de 2012, por exemplo, 26,1% da área total registrou GPP inferior a $600 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ com a aplicação do modelo de regressão, enquanto que nas imagens de GPP_{mod} sem ajuste a classe mais representativa continham valores entre 800 e $1000 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (26,7%). Ao longo de todos os anos, houve uma maior ocorrência de GPP acima de $2200 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, nas áreas de maior produtividade. As reduções dos valores de GPP nas áreas de menor produtividade seguem a lógica de correção da superestimativa que foi verificada na estimativa da GPP_{mod} em períodos de menor disponibilidade hídrica.

Figura 29- Variação espacial e interanual da produção primária bruta (GPP) da vegetação de Caatinga, derivada do produto MOD17A2H, referente ao período de 2001 a 2016.

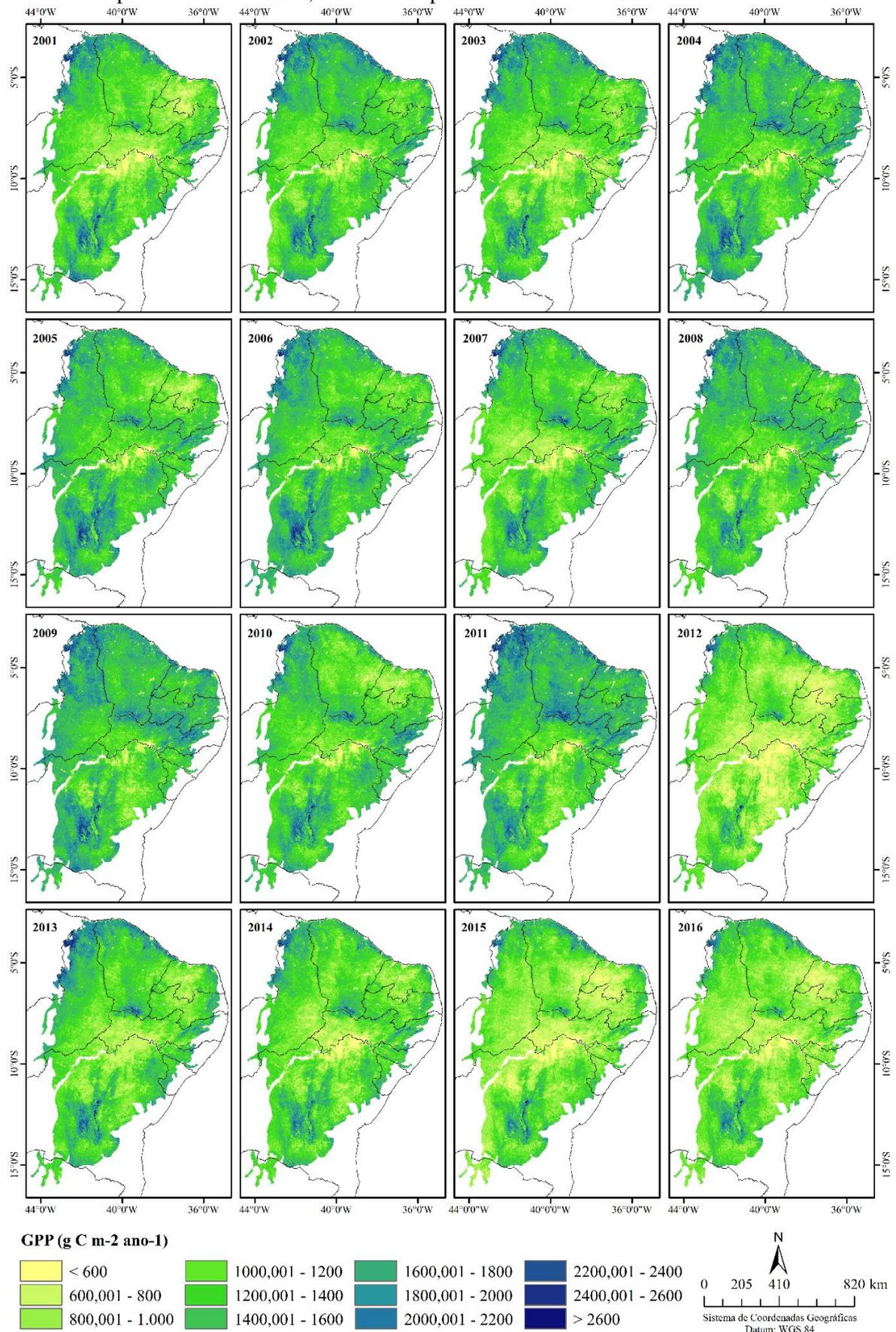
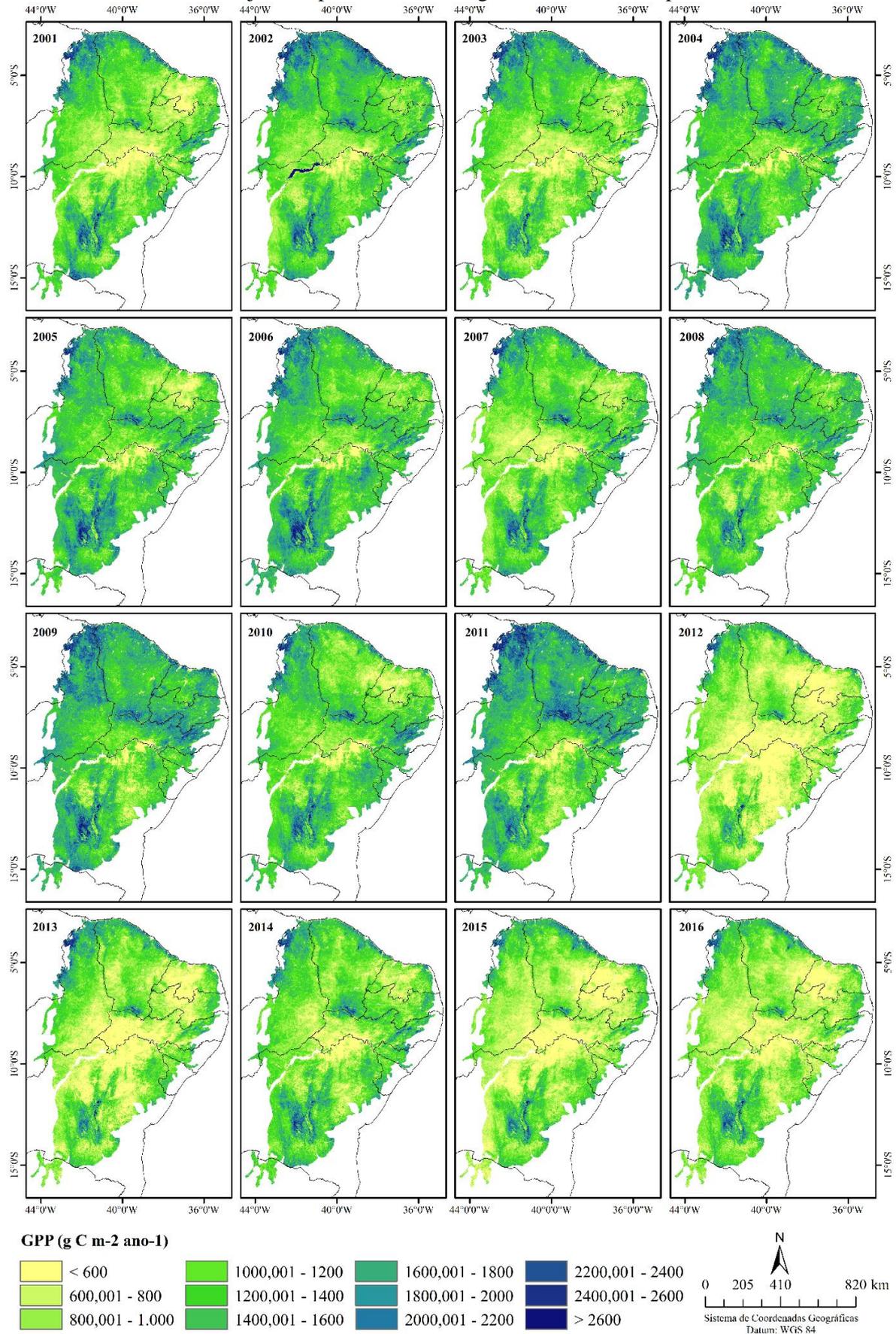
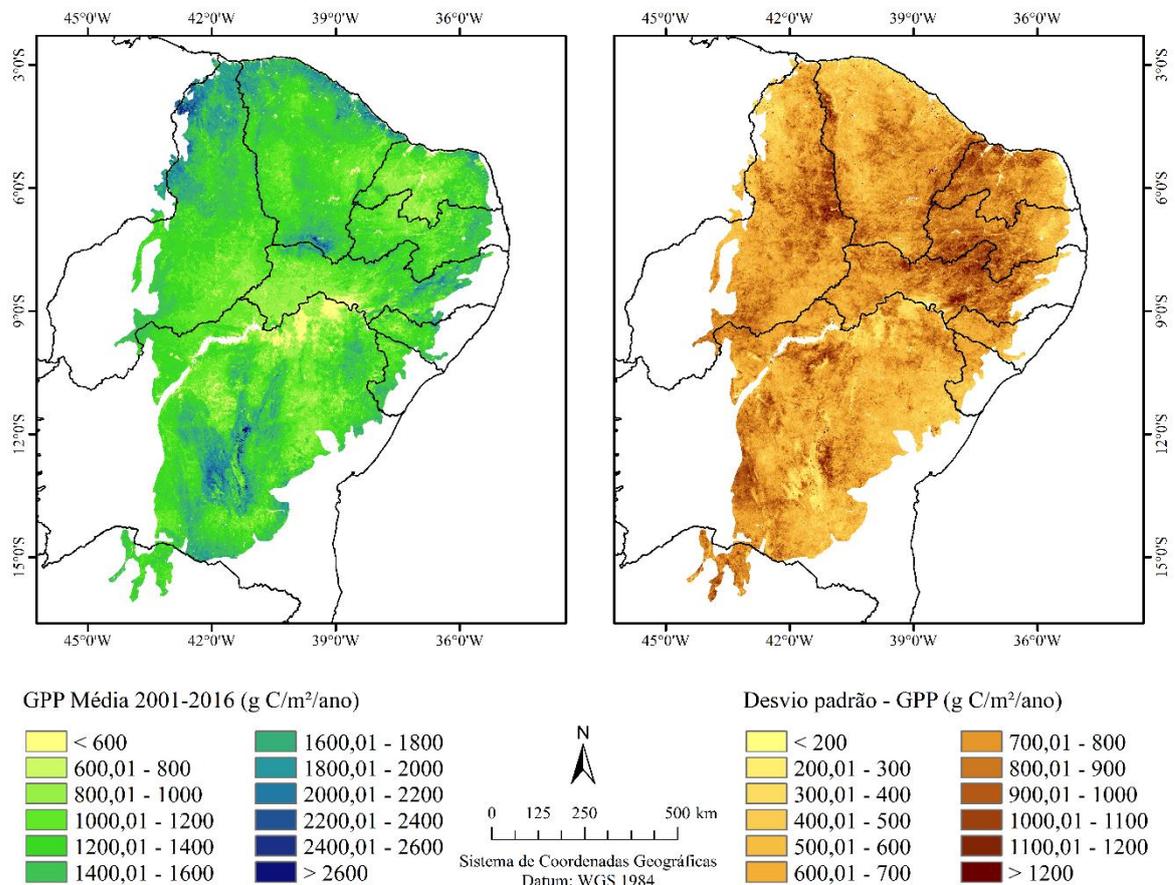


Figura 30- Variação espacial e interanual da produção primária bruta (GPP) da vegetação de Caatinga, derivada do MOD17A2H ajustado pelo modelo de regressão, referente ao período de 2001 a 2016.



No período entre 2001 e 2016, verificou-se uma relação entre a assimilação total de carbono pela Caatinga e a distribuição espacial da precipitação. A GPP média da Caatinga foi mais elevada nas áreas de transição com o Cerrado (noroeste), no litoral norte do Ceará, em alguns trechos no setor leste. Além disso, destacam-se algumas áreas no interior da Caatinga, que correspondem as Chapadas do Araripe (entre Pernambuco e Ceará) e da Diamantina (Bahia). Essas duas últimas juntamente com a porção noroeste da Caatinga se destacam por apresentarem valores de GPP superiores a $2000 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Figura 31). Os valores médios de GPP mais baixos ($< 600 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) podem ser visualizados na parte central da Caatinga, principalmente entre os estados de Pernambuco e da Bahia.

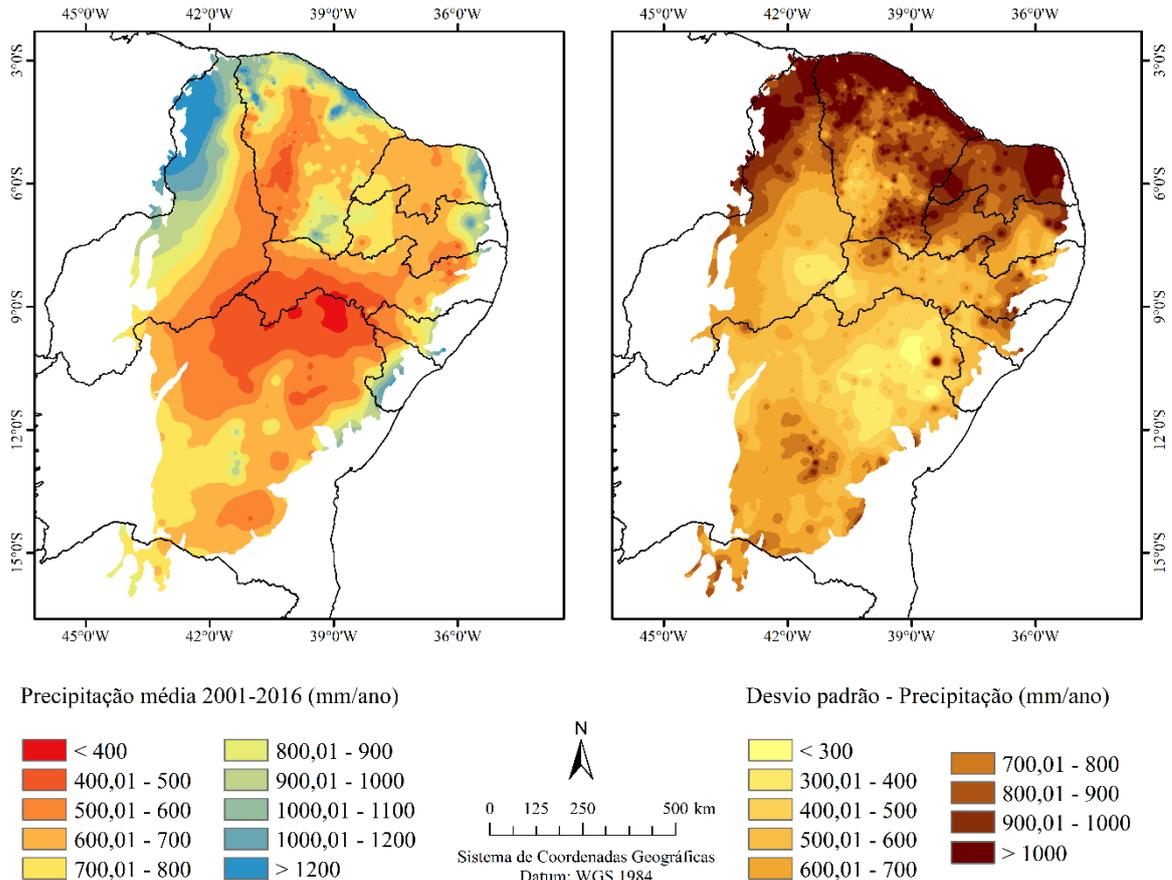
Figura 31- Comportamento espacial da produção primária bruta (GPP) média do período de 2001 a 2016, para o bioma Caatinga e o desvio padrão da GPP.



A precipitação pluviométrica média da Caatinga para o período entre 2001 e 2016 variou de 355 a 1710 mm anuais. As áreas mais úmidas correspondem a porção noroeste, algumas áreas no norte do Ceará e na porção leste da Caatinga, com valores superiores a 1200 mm. Observa-se, ainda, áreas que podem ser consideradas de exceção no interior da Caatinga (no

sul do estado do Ceará, próximo a região da Chapada do Araripe) e uma pequena porção no centro-sul da Bahia. Além disso, a análise do desvio padrão da precipitação (2001-2016) evidencia uma maior variabilidade dos dados no setor norte da Caatinga (>800 mm) (Figura 32).

Figura 32- Comportamento espacial da precipitação pluviométrica média do período de 2001 a 2016, para o bioma Caatinga e o desvio padrão.

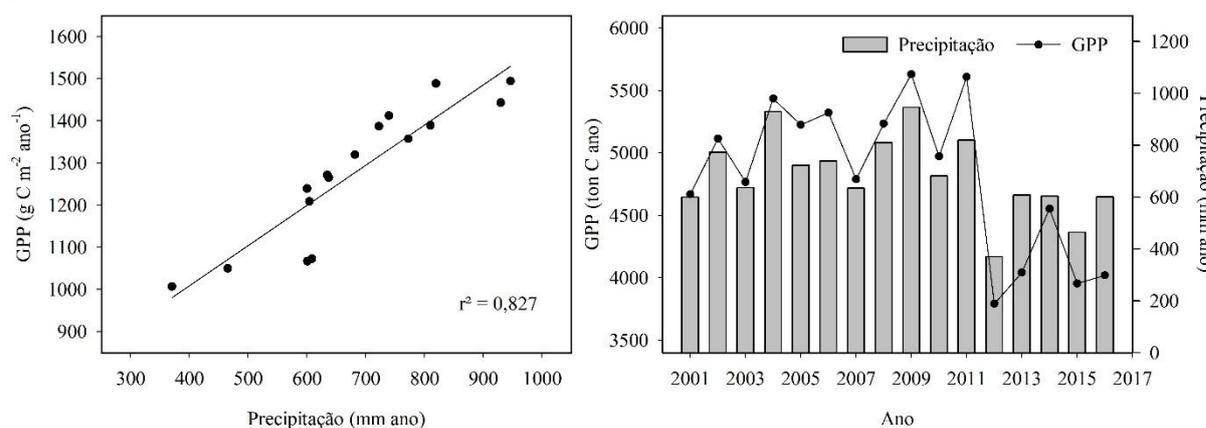


Apesar da precipitação exercer grande influência na assimilação de carbono pela vegetação de Caatinga, a correlação entre essas duas variáveis foi fraca quando realizada para cada pixel da imagem ao longo do período de 2001 a 2016 (dados não mostrados). Contudo, quando observados apenas os valores médios de GPP e da precipitação para toda Caatinga, encontrou-se uma forte correlação entre as variáveis ($r^2 = 0,83$). Nos anos em que a média da precipitação foi maior, a assimilação de carbono média também apresentou tendência de aumento, com exceção do ano de 2014.

Entre 2001 e 2016, a Caatinga assimilou em média 4820,3 ton C por ano, com destaque para os anos de 2009 e 2011, que registraram um acumulado de 5629 e 5607,9 ton C ano (Figura 33), respectivamente. Esses anos coincidem com os maiores valores médios de precipitação

para a Caatinga. Em contrapartida, no ano de 2012 – mais seco do período estudado, com média de precipitação de 370 mm – a GPP do bioma Caatinga foi de 3792,3 ton C ano. Tais resultados mostram a vulnerabilidade da Caatinga quanto a ocorrência de períodos prolongados de seca, refletindo, assim, na assimilação total de carbono, podendo ter efeitos também na produção de biomassa.

Figura 33- Correlação entre a GPP e a precipitação pluviométrica média anual da Caatinga entre 2001 e 2016 e quantitativo anual da assimilação de carbono pela vegetação do bioma Caatinga para o mesmo período.



Além da análise da GPP acumulada e média de todo bioma Caatinga, para o período de 2001 a 2016, foram gerados 1000 pontos aleatórios e extraiu-se os valores mensais e anuais para cada um deles. Portanto, a Figura 34 e 35 mostram a variação mensal e anual, respectivamente, da GPP média dos 1000 pontos. Observou-se que a GPP mensal média variou de 45,2 a 184,3 g C mês, enquanto a GPP anual média oscilou entre 1031,2 e 1532,3 g C ano. A variabilidade da GPP mensal não indicou tendência de aumento ou redução da GPP média dos pontos selecionados. Houve uma redução a partir do ano de 2012, associada ao período de seca prolongada, contudo não foi suficiente para demonstrar uma tendência clara de redução dos valores de GPP ($r^2 = 0,05$, ou seja, não houve um bom ajuste de linha para os dados). Os dados de GPP médios anuais exibiram uma leve tendência de redução ao longo do período de 2001 a 2016, influenciada pela GPP mais baixa dos anos de 2012, 2013, 2015 e 2016.

Gilbert et al. (2015), analisaram a GPP anual (2008 e 2011) de ecossistemas mediterrâneos na Espanha e verificaram que as áreas de vegetação esparsa apresentaram valores abaixo de 500 g C ano, enquanto pradarias mostraram valores de GPP intermediários (de 1000 a 1500 g c ano). Segundo os autores, os maiores valores anuais de GPP foram encontrados nas áreas mais úmidas, confirmando, assim, que a disponibilidade de água influencia fortemente a

distribuição espacial da vegetação. Também foi encontrada uma correlação forte e significativa em áreas de vegetação árida e semiárida, com r^2 variando de 0,59 a 0,8.

Figura 34- Variação mensal da produção primária bruta (GPP) média de 1000 pontos gerados aleatoriamente na área de abrangência da caatinga, para o período de 2001 a 2016.

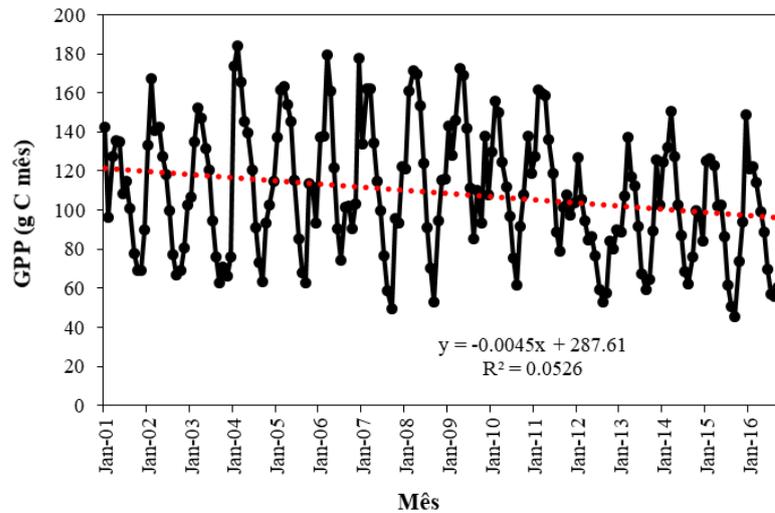
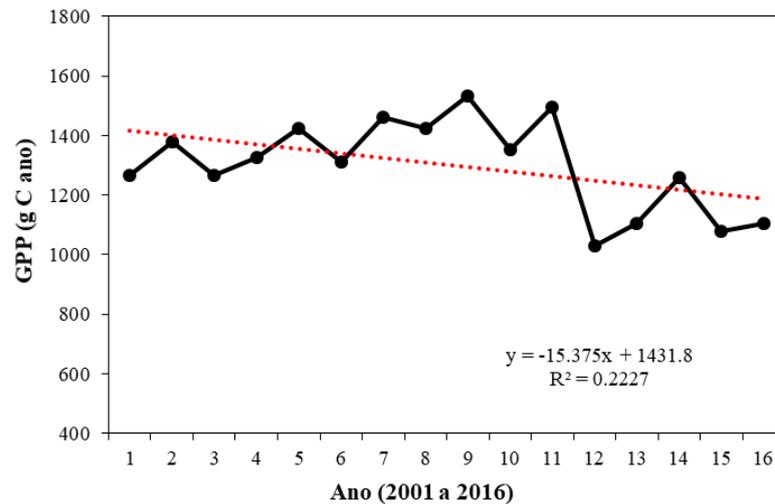


Figura 35- Variação anual da produção primária bruta (GPP) média de 1000 pontos gerados aleatoriamente na área de abrangência da caatinga, para o período de 2001 a 2016.



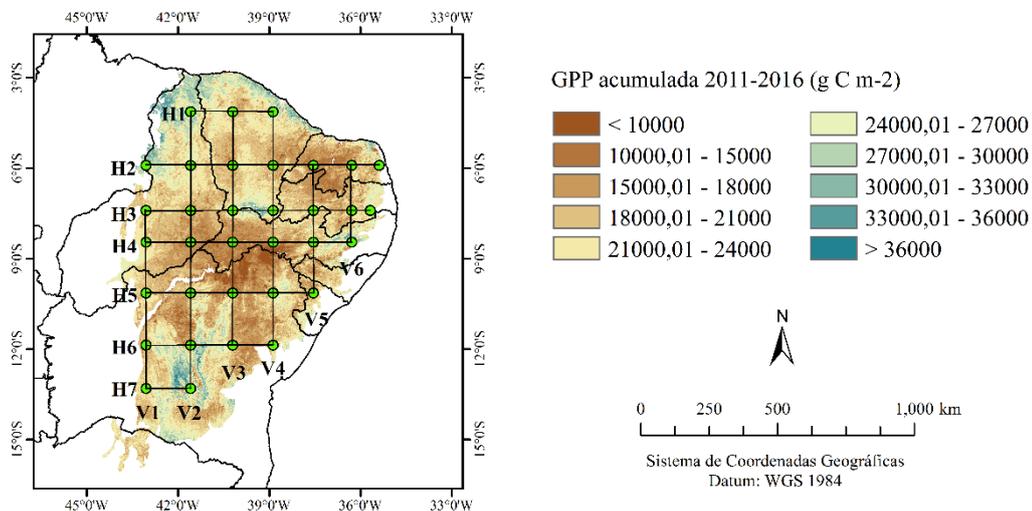
Dass et al. (2016) avaliaram o papel das mudanças na temperatura, precipitação, nebulosidade e incêndios florestais sobre a variação da GPP no norte da Eurásia, e verificaram que a temperatura foi responsável por explicar 26,1% da variação da GPP na região, enquanto a precipitação explicou 22,9% da variação. Os autores também constataram um aumento significativo da GPP em 69,1% da região, para o período de 1982 a 2010, e que a temperatura do ar foi a variável dominante que influenciou nos aumentos de GPP nas áreas de latitude mais

altas. No que se refere a precipitação, esta teve maior influencia no verão, que corresponde a estação de crescimento da vegetação.

4.2.4 Variação espacial da GPP acumulada pela Caatinga de 2001 a 2016 ao longo de transectos

Além da análise da variação interanual da GPP média da Caatinga e sua relação com a precipitação, também foram gerados transectos nos sentidos latitudinal e longitudinal ao longo do bioma Caatinga. A Figura 36 mostra a distribuição dos transectos, sendo sete deles traçados no sentido latitudinal, com início na porção oeste e término no leste da área oficial de Caatinga; outros seis transectos foram traçados de forma longitudinal, iniciando ao norte e com término no sul. A variação da GPP ao longo do transecto foi analisada no que se refere aos valores acumulados para o período de 2001 a 2016, para cada pixel cortado pelo Perfil.

Figura 36- Produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga de 2001 a 2016 e transectos traçados nos sentidos latitudinal e longitudinal.



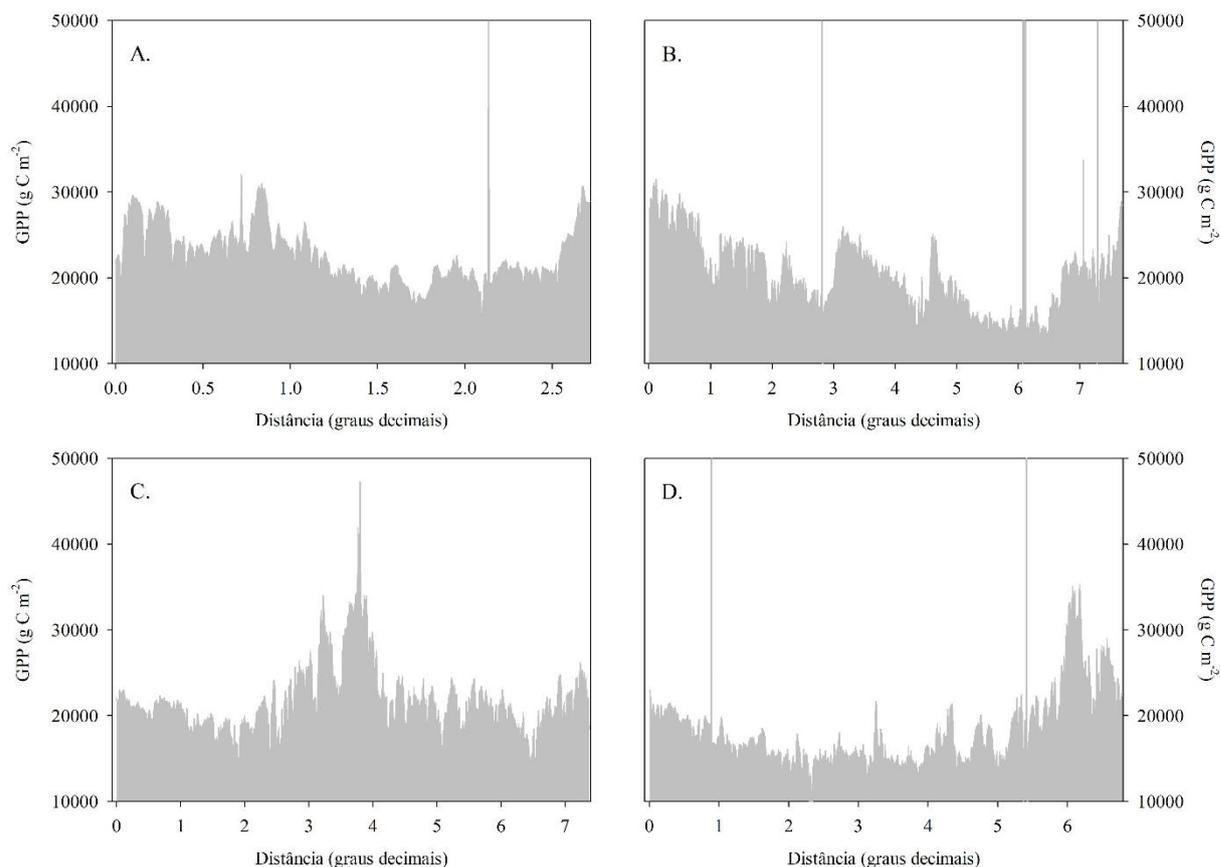
O Transecto H1 (Figura 37A) se inicia no estado do Piauí e segue até o Ceará, onde a GPP acumulada ao longo do período entre 2001 e 2016 variou de 14145,9 a 32039,1 g C m⁻². Os valores mais elevados foram registrados no início do transecto (até 0,4 graus decimais de distância e entre 0,7 e 0,9 graus decimais) e no final do perfil, com valores de GPP superiores a 27000 g C m⁻². No início do perfil os valores mais elevados estão associados a uma cobertura vegetal mais densa localizada na Serra da Ibiapaba e no final do transecto referente a vegetação da Serra do Baurité, no estado do Ceará. A GPP do transecto H2 teve uma amplitude de variação maior do que o anterior, com valor mínimo de 8793,4 g C m⁻² e máximo de 33743,3 g C m⁻².

O comportamento da GPP ao longo do perfil (H2) evidenciou algumas áreas com GPP mais elevada – no início do transecto até a distância de 0,9 graus decimais (Figura 37B). De 2,1 a 4,8 graus decimais de distância o transecto corta o estado do Ceará, onde os valores de GPP variaram de acordo com o tipo de cobertura presente na área. Até a distância de 3 graus decimais, por exemplo, a GPP foi mais baixa (entre 20000 e 24000 g C m⁻²), na região no Sertão do Inhamus e em parte do Centro-Sul do Ceará. No estado do Rio Grande do Norte os valores tendem a aumentar conforme se aproxima da região mais a leste da Caatinga, com valores atingindo GPP de 29000 g C m⁻², aproximadamente. Neste último caso, apesar de alguns pontos do transecto serem influenciados pela densidade da cobertura vegetal, nota-se uma tendência de elevação da GPP conforme o aumento do gradiente de umidade (precipitação).

O transecto H3 apresentou, em geral, pouca variação da GPP até a distância aproximada de 2,6 graus decimais (Figura 37C). A partir de então os valores de GPP crescem até atingir o valor máximo de 47240,9 g C m⁻². A GPP mais elevada neste trecho do transecto está localizada na região da Chapada do Araripe. Após essa região, a GPP volta a reduzir para o patamar de 21000 a 22000 g C m⁻² e atinge valor mínimo de 14093,3 g C m⁻², no Agreste paraibano, próximo ao município de Queimadas. O transecto H4 se inicia do estado do Piauí e a partir da distância 2 graus decimais passa a cortar o estado de Pernambuco (Figura 37D). Observou-se que houve pouca variação da GPP ao longo do perfil H4 até próximo a 5 gd de distância, a partir da qual a GPP tem um crescimento até atingir o máximo de 35274 g C m⁻². Os valores de GPP localizados no Piauí são ligeiramente superiores àqueles registrado em Pernambuco, o que se deve ao fato da vegetação de caatinga se encontrar mais antropizada e fragmentada no último.

No transecto H5, a GPP acumulada de 2001 a 2016 variou de 6230,8 g C m⁻² a 31540 g C m⁻² (Figura 38E). Os valores mais elevados foram registrados no trecho entre 1,8 e 2 graus decimais de distância e na parte final do Perfil. No início do transecto, na porção noroeste da Bahia, a GPP foi mais baixa em virtude da presença de algumas áreas com solo exposto (neossolo quartzarênico) ou com densidade da cobertura vegetal mais baixa. Entre 2,1 e 2,6 graus decimais de distância também observou-se valores de GPP baixos, inferiores a 15000 g C m⁻², em área bastante antropizada localizada no município de Campo Formoso, Bahia.

Figura 37- Variação da produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga, entre os anos de 2001 e 2016, ao longo de transectos latitudinais (oeste-leste).

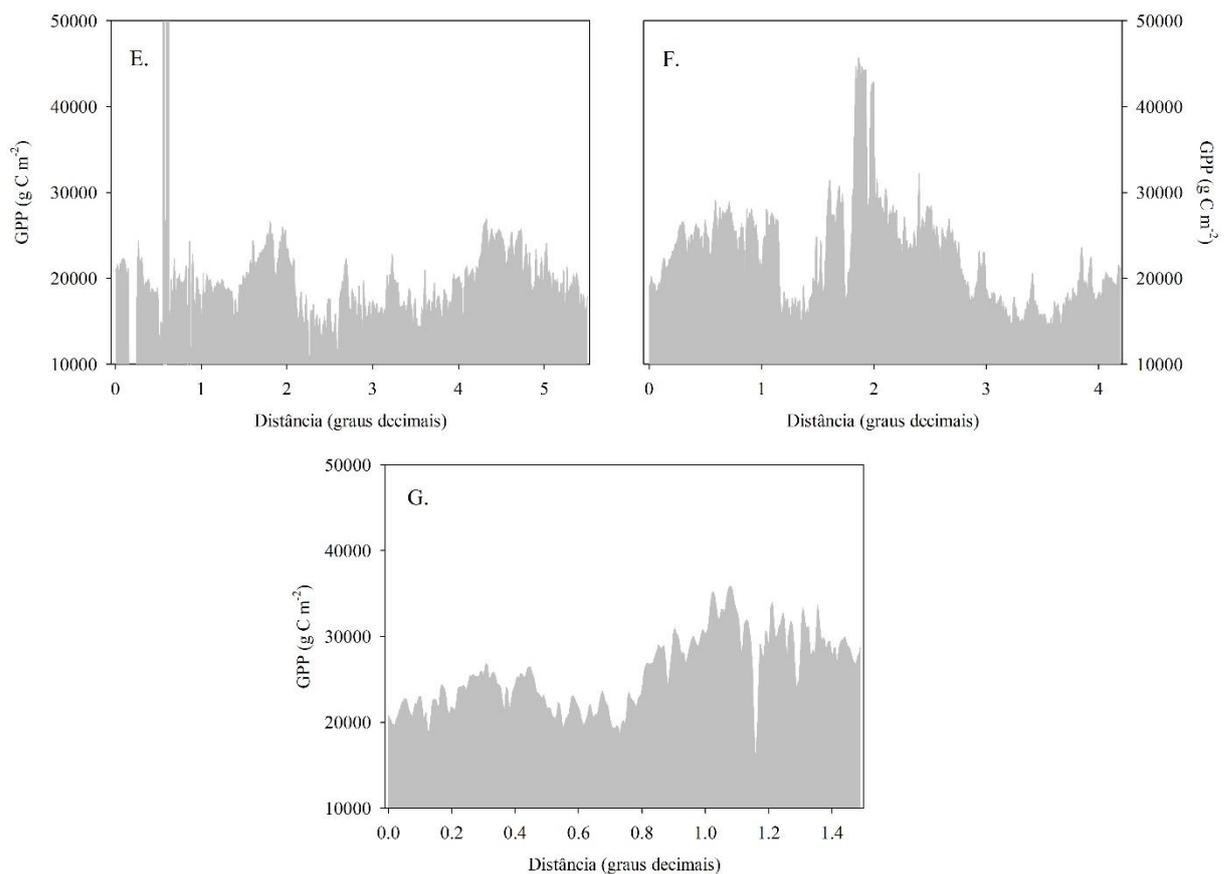


A GPP ao longo do transecto H6 apresentou maior variabilidade, quando comparada aos demais. O perfil traçado se encontra totalmente no estado da Bahia, e corta regiões com diferentes usos e cobertura da terra e de altitude (Figura 38F). O início do transecto H6 tem uma curva ascendente, que atinge valores de até 28000 g C m⁻² em alguns pontos. Logo em seguida, entre 1,1 e 1,5 graus decimais de distância, houve uma redução da GPP acumulada, com valores inferiores a 19000 g C m⁻². Essas áreas com GPP mais baixa estão localizadas na microrregião de Irecê, onde se verifica a presença de atividades agropecuárias e a inexistência, praticamente, de cobertura vegetal nativa. Após a região de Irecê, a assimilação total de carbono tem um crescimento até o valor máximo de 45726 g C m⁻², na região dos planaltos e serras da Diamantina (municípios de Bonito e Morro do Chapéu). O trecho final do transecto apresenta uma redução nos valores de GPP, e apresenta comportamento variável de acordo com a cobertura da terra. Essa área se encontra bastante antropizada e a caatinga fragmentada, o que proporcionou a ocorrência de GPP mais elevada seguida por valores mais baixos.

O sétimo transecto latitudinal (H7) é o menor em distância e perpassa por regiões da depressão sertaneja e de relevo mais elevado (Figura 38G). A assimilação de carbono total do

período de 2001 a 2016 variou de 15817 g C m^{-2} a 39869 g C m^{-2} . No início do perfil H7 os valores de GPP foram mais baixos do que no final do mesmo. A GPP inicia com valores entre 19000 g C m^{-2} e 22000 g C m^{-2} , e depois tem um aumento que atinge o valor de 26878 g C m^{-2} (por volta de 0,3 graus decimais de distância), estando este trecho do transecto situado em regiões mais elevadas da unidade das Serra do Espinhaço. Posteriormente, houve uma redução associada a uma área antropizada para, em seguida, ter um aumento gradativo da GPP na região dos Planaltos e Serras da Diamantina.

Figura 38- Variação da produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga, entre os anos de 2001 e 2016, ao longo de transectos latitudinais (oeste-leste).



Em relação aos transectos longitudinais, traçados no sentido norte-sul, verificou-se que a GPP dos pontos cortados pelo transecto V1 apresentou pouca variação, com valor mínimo de 15041 g C m^{-2} e máximo de 24381 g C m^{-2} ; contudo, a maioria dos valores se concentrou no intervalo 18000 a 22000 g C m^{-2} (Figura 39A). Esse transecto está situado no estado do Piauí e Bahia, e passa por áreas que apresentam um nível de antropização mais baixo. A falha presente entre 3,5 e 3,7 graus decimais de distância corresponde ao rio São Francisco. Essa falha é seguida por alguns valores de GPP mais baixos, em relação aos demais pontos, em decorrência

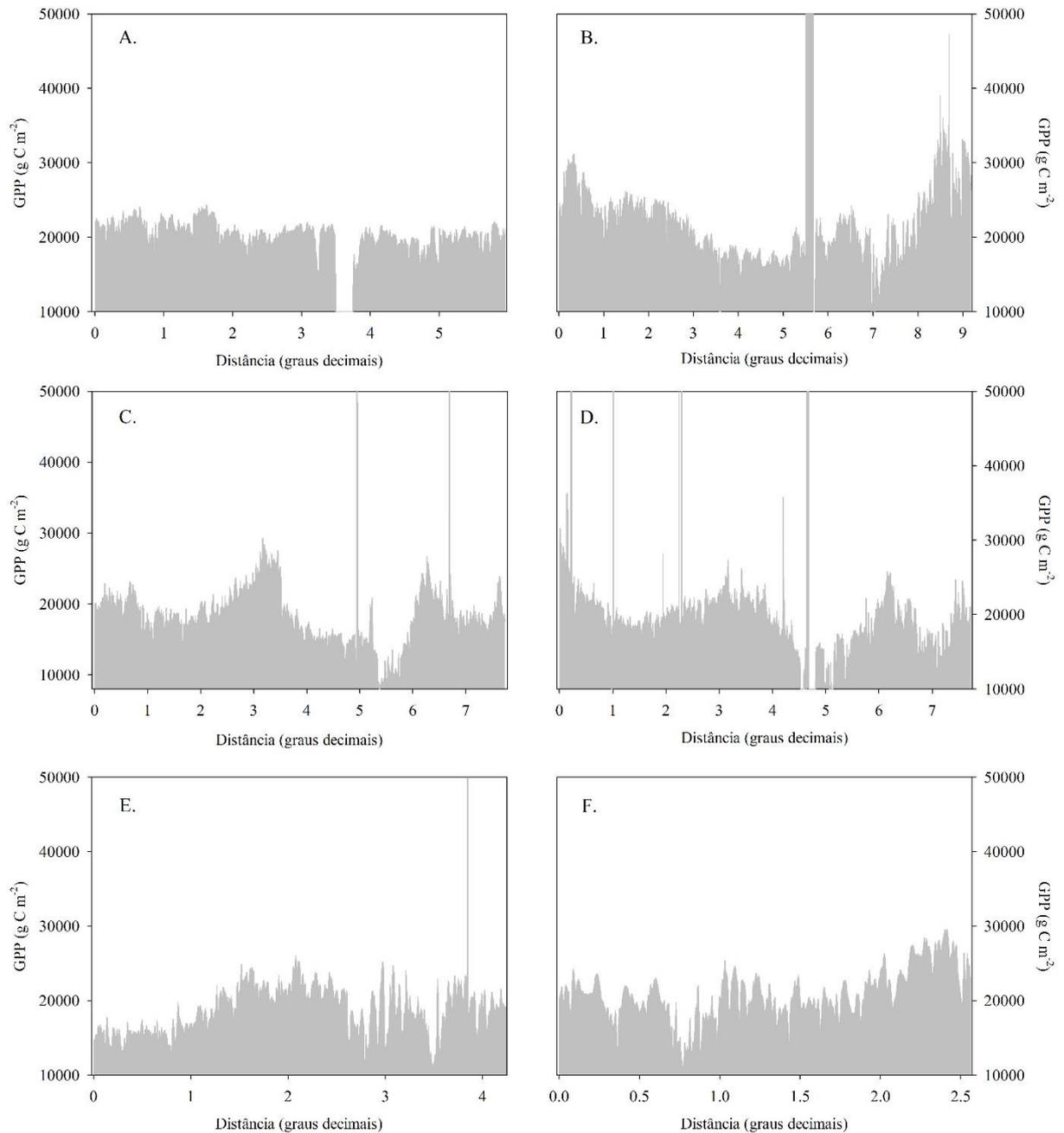
da presença de solo arenoso e com pouca cobertura vegetal, localizado nas margens do rio São Francisco.

O transecto V2 evidenciou um gradiente de variação da GPP maior, em que o valor mínimo foi de 10026 g C m^{-2} e o máximo de 47282 g C m^{-2} (Figura 39B). No início do transecto, até 2,8 graus decimais de distância, observou-se valores elevados de GPP (com pico de 31186 g C m^{-2}), associados a uma vegetação de caatinga arbórea mais conservada. De 2,8 a 5,3 graus decimais de distância houve uma redução da GPP, como consequência de uma maior antropização e fragmentação, com presença de atividades agropecuárias. Entre 6,7 e 7,5 graus decimais de notou-se uma redução da GPP, na região de Irecê, estado da Bahia, que tem como destaque a utilização de suas terras para produção agrícola. E, no final do transecto, a GPP apresentou um crescimento, referente aos pontos situados na região dos planaltos e serras da Diamantina.

O transecto V3 (Figura 39C) se inicia no norte do Ceará com valores de GPP acumulada entre 19000 e 22000 g C m^{-2} . Entre 0,7 e 2 graus decimais de distância houve uma leve redução da GPP acumulada, em uma área de ocorrência de luvisolos (municípios de Tauá e Independência). A partir dessa distância os valores de GPP têm um crescimento até atingir o máximo de 29336 g C m^{-2} , na região da Chapada do Araripe. Os valores diminuem, novamente, no estado de Pernambuco, onde a caatinga está mais fragmentada e próximo ao rio São Francisco, nos municípios de Juazeiro e Jaguarari, Bahia (entre 5 e 6 graus decimais de distância). Nessa área, a cobertura vegetação é de baixa densidade, associada a ocorrência dos planossolos háplicos.

No que se refere ao transecto V4 (Figura 39D), observou-se que o início do transecto apresentou GPP acumulada mais elevada que as demais, estando associada ao tipo de cobertura vegetal diferenciado e às condições de umidade da região da Serra do Baturité, estado do Ceará. Por outro lado, os valores de GPP mais baixos foram registrados entre os estrados de Pernambuco e Bahia (4,2 a 5,5 graus decimais de distância). Parte dessa área encontra-se inserida em um núcleo de desertificação, em que se verifica processos de degradação e intensa antropização. Além disso, essa região tem cobertura vegetal menos densa (caatinga arbustiva), associada aos luvisolos e planossolos nátricos. Os transectos V5 e V6 (Figura 39E e 39F) cortam áreas de caatinga bastante antropizada, principalmente na região do Seridó Oriental da Paraíba e Agreste paraibano (0,6 a 1,3 graus decimais do transecto V6 – Figura 39F).

Figura 39- Variação da produção primária bruta (GPP) acumulada pelo bioma Caatinga, entre os anos de 2001 e 2016, ao longo de seis transectos longitudinais (norte-sul).



A variação da GPP ao longo dos transectos foi influenciada, principalmente, pelo uso e cobertura da terra. No que se refere à cobertura vegetal, é importante destacar a variedade de fisionomias e de vegetação inseridos no bioma Caatinga. Na região ou complexo Ibiapaba-Araripe a vegetação é composta por zonas de Caatinga, Floresta Estacional e Cerrado (ASSINE, 1992). Na Chapada Diamantina, que compreende uma das áreas mais elevadas do bioma Caatinga, a ocorrência de precipitação mais elevada em algumas áreas (> 700 mm/ano) proporciona uma maior diversidade de cobertura vegetal, com presença de vegetação de

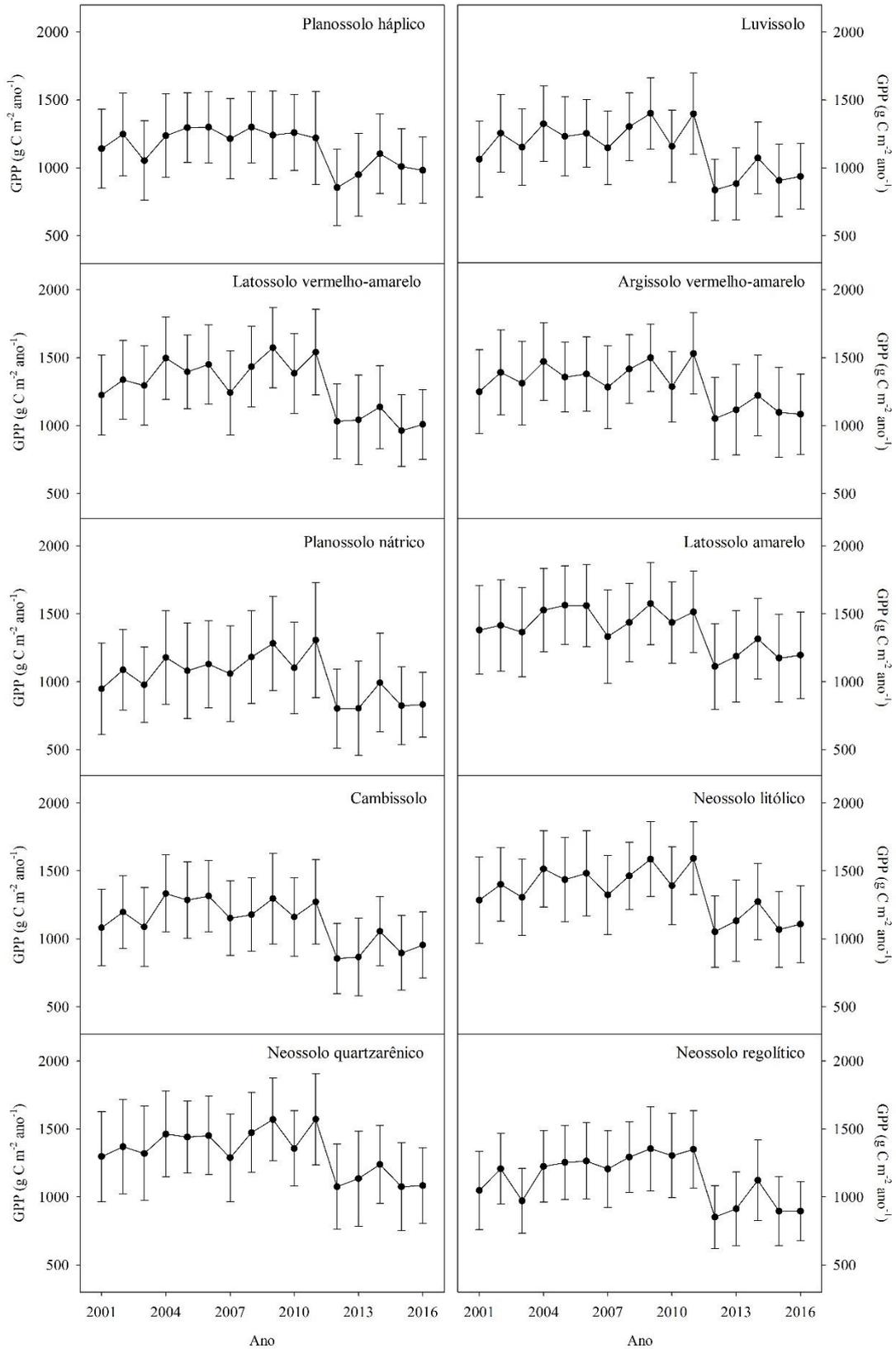
cerrado, campos rupestres e áreas de caatinga (VELLOSO et al., 2002). Nas áreas mais baixas correspondente à Depressão sertaneja, predomina áreas de caatinga arbórea e arbustiva e, especificamente, nas regiões do Seridó e Cariris Velhos a vegetação é de porte mais baixo, enquanto algumas áreas apresentam cobertura mais aberta com ocorrência de plantas herbáceas. Tais características foram responsáveis por diferenças na GPP acumulada por áreas vegetadas situadas em regiões de relevo mais elevado e aquelas localizadas em locais mais secos da depressão sertaneja.

Em áreas de caatinga antropizada verificou-se que a GPP foi mais baixa. Por exemplo, o transecto V3 e H4 cortam a porção oeste do estado de Pernambuco, onde na bacia hidrográfica do riacho do Pontal, especificamente, Miranda et al. (2018) verificaram uma redução da cobertura de caatinga ao longo dos últimos 30 anos (90,25% para 61% da área total) e um aumento da fragmentação. No município de Petrolina, Pernambuco, Morais et al. (2017), utilizando produtos MODIS GPP, observaram que as áreas antropizadas, associadas à exploração de lenha e à agricultura de sequeiro, apresentaram menores valores de GPP ao longo de 2011 e 2012. No município de Belém de São Francisco (transecto H4), Pernambuco, Assis et al. (2014) verificaram uma redução da cobertura vegetal densa de caatinga e um aumento das áreas de solos exposto, relacionadas ao desmantamento e aos processos de degradação do solo.

4.2.5 Variação interanual da GPP por classe de solo

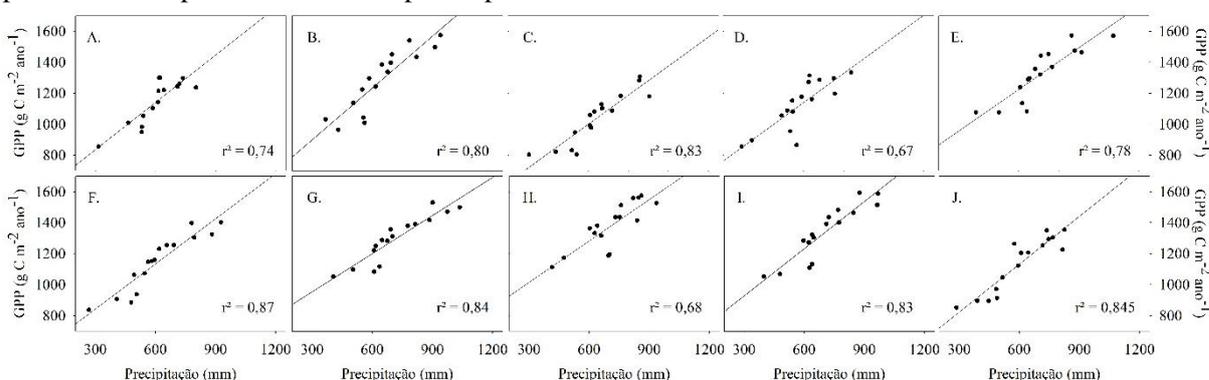
O comportamento e quantitativo do carbono assimilado pela vegetação de caatinga foi avaliado, também, a partir dos diferentes tipos de solo presentes no bioma. Buscou-se, portanto, verificar se os solos, por meio de suas principais características, exercem alguma influência sobre a GPP, seja de magnitude ou de variação anual. Sendo assim, a Figura 40 mostra a variação interanual da GPP para cada classe de solo que ocorre no bioma Caatinga. Ao longo do período de 2001 a 2016, os solos que apresentaram, em média, os maiores valores de GPP foram o latossolo amarelo e neossolo litólico, com $1380,3 \text{ g C m}^{-2}$ e $1338,7 \text{ g C m}^{-2}$, respectivamente. Pode-se destacar, ainda, a classe do argissolo vermelho-amarelo e do neossolo quartzarênico, com GPP média (2001 a 2016) de $1296,9 \text{ g C m}^{-2}$ e $1325,8 \text{ g C m}^{-2}$, respectivamente. Em contrapartida, a GPP média mais baixa foi obtida na classe dos planosolos nátricos ($1036,5 \text{ g C m}^{-2}$), neossolos regolíticos ($1134,8 \text{ g C m}^{-2}$) e luvissolos crômicos ($1145,7 \text{ g C m}^{-2}$).

Figura 40- Variação interanual da produção primária bruta (GPP) média para as principais classes de solos presentes no bioma Caatinga, entre os anos de 2001 a 2016.



A variação anual da GPP por classe de solo foi influenciada pela variabilidade da precipitação no decorrer do período analisado. Portanto, observou-se que houve uma forte correlação entre GPP e precipitação para praticamente todas as classes de solos, com exceção da classe dos cambissolos e dos latossolos ($r^2 = 0,67$ e $0,68$, respectivamente). A relação mais forte mais encontrada para os luvisolos e neossolos regolíticos (Figura 41). Além disso, foi possível constatar que em alguns casos, a precipitação registrada no ano anterior influenciou na quantidade de carbono assimilado pela vegetação no ano seguinte. Isto pode ser verificado para classe dos neossolos quartzarênicos, em que a GPP do ano de 2012 foi de $1075,5 \text{ g C m}^{-2}$ e a de 2013 foi de $1134,9 \text{ g C m}^{-2}$, mesmo com uma diferença de 231 mm de precipitação – nesse caso, a precipitação de 2011 foi responsável por essa diferença baixa.

Figura 41- Correlação entre os valores médios da produção primária bruta e da precipitação pluviométrica, por classe de solo, para o período entre 2001 a 2016.



As áreas de luvisolos, onde foram registrados os menores valores de GPP médios, estão distribuídas entre os estados de Pernambuco e da Paraíba, no oeste do Ceará e norte e centro da Bahia. Estes solos são conhecidos pela alta suscetibilidade à erosão, em virtude da grande diferença de textura entre os horizontes A e Bt. Além disso, os luvisolos são rasos a pouco profundos, e pode apresentar revestimento pedregoso na superfície. Essas características dificultam a infiltração de água no solo e a penetração das raízes, o que impacta da estrutura da vegetação. Algumas das áreas de luvisolos apresentam uma vegetação de caatinga de porte arbustivo, ou estão em processo de degradação. Santos et al. (2009) analisaram a diversidade e estrutura da vegetação de Caatinga em área de luvisolo no município de Floresta, Pernambuco, e constataram um menor número de espécies no estrato das lenhosas baixas (50 cm a 3 m). Além disso, os autores indicaram que os resultados encontrados foram influenciados pelo elevado grau de antropização da área, que possui histórico de uso destinado ao sobrepastoreio e extração de lenha.

5 CONCLUSÕES

- A comparação entre a GPP derivada do MODIS com a GPP medida pelo sistema de vórtices turbulentos mostrou uma correlação moderada e um REQ_M elevado. Houve uma superestimativa dos valores de GPP durante os períodos com menor disponibilidade hídrica, tanto na estação seca como no período chuvoso dos anos mais secos. Isto evidencia a incapacidade do algoritmo, em especial, do déficit de pressão de vapor em limitar a eficiência do uso da luz durante esses períodos.
- A substituição do DPV pela fração evaporativa melhorou a estimativa da GPP, principalmente, no período seco. A fração evaporativa está mais associada a umidade do solo e a condutância estomática da vegetação, o que resultou em uma melhor relação com a GPP_{ec}.
- O principal fator que condicionou a variação temporal da GPP foi a precipitação pluviométrica, tanto da área de caatinga preservada como em todo bioma. Outras variáveis, como temperatura e radiação global, não mostraram relações com a GP_{Pmod} e GPP_{ec}. Além disso, a precipitação mais baixa nos últimos anos do período analisado influenciou para a ocorrência de uma tendência leve de redução da GPP anual média de pontos aleatórios. Mesmo os dados não tendo um bom ajuste a linha de tendência e conhecendo-se que essa precipitação mais baixa faz parte da variabilidade existente na região, tais resultados demonstram que diante de uma possível redução da precipitação para o semiárido nordestino, a GPP também tende a diminuir.
- Na análise da GPP por meio da elaboração de transectos, constatou-se que as áreas antropizadas, sobretudo, com presença de atividades agropecuárias, apresentaram valores de GPP inferiores as demais. Isto se deve a uma maior presença de solo exposto (permanente ou em parte do ano, em culturas de ciclos anuais) e pela influência da antropização e fragmentação da caatinga sobre a estrutura e funcionamento da vegetação.
- Os tipos de solo, por meio de suas características gerais, influenciaram pouco na quantidade de carbono assimilado pela vegetação de caatinga. Áreas de luvisolos e planossolos, por exemplo, registram menores valores médios de GPP ao longo de 2001 a 2016, o que pode estar relacionado com as limitações físicas que esses solos impõem ao desenvolvimento das espécies vegetais. Em outras classes de solos não foi possível

estabelecer a mesma relação, pois outras variáveis, como o uso e cobertura da terra, podem ter influenciado a GPP.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. T.; DELGADO, R. C.; GALVÃO, L. S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; RAMOS, M. C. Improvements of the MODIS Gross Primary Productivity model based on a comprehensive uncertainty assessment over the Brazilian Amazonia. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, part B, p. 268-283, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.016>>. Acesso em: 02 de Agosto de 2018.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. N.; SPAPOVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507. Disponível em: <https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil>. Acesso em: 05 de novembro de 2018.

ÁLVAREZ-TABOADA, F.; TAMMADGE, D.; SCHLERF, M.; SKIDMORE, A. Assessing MODIS GPP in Non-Forested Biomes in Water Limited Areas Using EC Tower Data. **Remote Sensing**, v. 7, p. 3274-3292, 2015. doi:10.3390/rs70303274. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/7/3/3274/htm>>. Acesso em: 14 de junho de 2016.

ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n.3, p 126 -135, 2009. Disponível em: <<https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/download/560/645>>. Acesso em 01 de setembro de 2015.

ASSIS, J. M. O.; CALADO, L. O.; SOUZA, W. M.; SOBRAL, M. C. Mapeamento do uso e ocupação do solo no município de Belém de São Francisco - PE nos anos de 1985 e 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 5, p. 859-870, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233337>>. Acesso em: 29 de agosto de 2015.

BALDOCCHI, D. D. Assessing ecosystem carbon balance: problems and prospects of the eddy covariance technique. **Global Change Biology**, v. 9, p. 479-492, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>>. Acesso em: 15 de junho de 2016.

BARBOSA H. A.; KUMAR, T. V. L. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 124, p. 377-387, 2016. Disponível: <<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.015>>. Acesso em: 25 de maio de 2017.

BARFORD, C. C.; WOFSY, S. C.; GOULDEN, M. L.; MUNGER, J.W.; HAMMOND PYLE, E.; URBANSKI, S. P.; HUTYRA, L.; SALESKA, S. R.; FITZJARRALD, D.; MOORE, K. Factors controlling long-and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a

mid-latitude forest. **Science**, v. 294, n. 5547, 1688–1691, nov., 2001. DOI: 10.1126/science.1062962 Disponível em: <<https://science.sciencemag.org/content/294/5547/1688>>. Acesso em: 25 de maio de 2017.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015. Acesso em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017>>. Acesso em: 25 de maio de 2017.

CONSELHO NACIONAL DA RESERVA DA BIOSFERA DA CAATINGA. **Cenários para o Bioma Caatinga**. Recife, BRA: SECTMA, 2004. p. 283

COOPS, N. C.; BLACK, T. A.; JASSAL, R. S.; TROFYMOW, J. A.; MORGENSTERN, K. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 3, p. 385–401, 12 abr. 2007. doi:10.1016/j.rse.2006.09.010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706003427>>. Acesso em: 02 de junho de 2015.

CHAPIN, F. S.; WOODWELL, J. T.; RANDERSON, J. T.; RASTETTER, E. B.; LOVETT, G. M.; BALDOCCHI, D. D.; CLARK, D. A.; HARMON, M. E.; SCHIMEL, D. S.; VALENTINI, R.; WIRTH, C.; ABER, J. D.; COLE, J. J.; GOULDEN, M. L.; HARDEN, J. W.; HEIMANN, M.; HOWARTH, R. W.; MATSON, P. A.; MCGUIRE, A. D.; MELILLO, J. M. et al. Reconciling carbon-cycle concepts , terminology, and methods. **Ecosystems**, v. 9, n. 7, p. 1041-1050, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10021-005-0105-7>>. Acesso em: 25 de maio de 2017.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados [online]**. 2008, vol.22, n.63, pp.61-82. ISSN 0103-4014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200005>>. Acesso em: 02 de junho de 2015.

DESAI, A. R.; RICHARDSON, A. D.; MOFFA, A. M.; KATTGE, J.; HOLLINGER, D. Y.; BARR, A.; FALGE, E.; NOORMETS, A.; PAPALE, D. REICHSTEIN, M. et al. Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 148, 821–838, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.012>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

EAMUS, D.; HUTLEY, L. B.; O'GRADY, A. P. Daily and seasonal patterns of carbon and water fluxes above a north Australian savanna. **Tree Physiology**, v. 21, p. 977–988, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/treephys/21.12-13.977>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 107, p.43-61, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00225-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00225-2)>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; RASMUSSEN, M. S.; STISEN, S.; DIOUF, A. Evaluation of satellite based primary production modeling in the semi-arid Sahel. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 3, p. 173-188, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.011>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

FLEISCHER, E., KHASHIMOV, I., HÖLZEL, N., KLEMM, O. Carbon exchange fluxes over peatlands in Western Siberia: possible feedback between land-use change and climate change. **Science of the Total Environment**, v. 545–546, p. 424–433, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.073>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

FRIEDL, M.; SULLA-MENASHE, D. MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.006

GANG, C; ZHANG, Y.; WANG, Z.; CHEN, Y.; YANG, Y.; LI, J.; CHENG, J.; QI, J.; ODEH, I. Modeling the dynamics of distribution, extent, and NPP of global terrestrial ecosystems in response to future climate change. **Global and Planetary Change**, v. 148, p. 153-165, jan., 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.12.007>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2018.

GANG, C.; ZHOU, W.; LI, J.; CHEN, Y.; MU, S.; REN, J.; CHEN, J.; GROISMAN, P. Y. Assessing the spatiotemporal variation in distribution, extent and NPP of terrestrial ecosystems in response to climate change from 1911 to 2000. **PLoS ONE**, v. 8, n. 11, nov., p. 1-12, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080394>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2017.

GARIGLIO, M. A. A Rede de manejo florestal da caatinga. In: _____ et al. (Org.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. p. 199-204.

GELYBÓ, G.; BARCZA, Z.; KERN, A.; KLJUN, N. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 174-175, p. 43-53, 2013. DOI:10.1016/j.agrformet.2013.02.003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.02.003>>. Acesso em: 15 de janeiro 2017.

GILABERT, M. A.; MORENO, A.; MASELLI, F.; MARTÍNEZ, B.; CHIESI, M.; SÁNCHEZ-RUIZ, S.; GARCÍA-HARO, F. J.; PÉREZ-HOYOS, A.; CAMPOS-TABERNER, M.; PÉREZ-PRIEGO, O.; SERRANO-ORTIZ, P.; CARRARA, A. Daily GPP estimates in Mediterranean ecosystems by combining remote sensing and meteorological data. **ISPRS**

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 102, p. 184-197, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.017>>. Acesso em: 30 de outubro de 2016.

GIONGO, V. et al. Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1233–1253, 2011. Disponível em: < <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232769/26771>>. Acesso em: 12 de abril de 2015.

GRACE, J.; JOSE, J. S.; MEIR, P.; MIRANDA, H. S.; MONTES, R. A. Productivity and carbon fluxes of tropical savanna. **Journal of Biogeography**, 33, 387–400, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01448.x>>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

HAUF, S. N. **Representatividade do Sistema Nacional de Unidades de Conservação no Bioma Caatinga**. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Projeto BRA/00/021: Sustentabilidade e Repartição dos Benefícios da Biodiversidade. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2010

HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R. R.; DAVIS K. J., et al. (2006). Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, p. 1908–1925, 2006. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1645290>>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

HOBBS, T. J.; NEUMANN, C. R.; MEYER, W. S.; MOON, T.; BRYAN, B. A. Models of reforestation productivity and carbon sequestration for land use and climate change adaptation planning in South Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 279-288, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.049>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2017.

HUETE, A.R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 6, L06405, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2005GL025583>>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

HUETE, A.R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W. van. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.59, p.440-451, 1997. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

HUTLEY, L. B.; LEUNING, R.; BERINGER, J.; CLEUGH, H. A. The utility of the eddy covariance techniques as a tool in carbon accounting: tropical savanna as a case study. **Australian Journal of Botany**, v. 53, n. 7, p. 663-675, 2005. Disponível em: < <http://www.publish.csiro.au/BT/BT04147>>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

JAHAN, N.; GAN, T. Y. Modeling gross primary production of deciduous forest using remotely sensed radiation and ecosystem variables. **Journal Geophysical Research**, v. 114, G4026, 2009. doi:10.1029/2008JG00091. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JG000919>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2017.

JENKINS, P.; RICHARDSON, A. D.; BRASWELL, B. H.; OLLINGER, S. V.; HOLLINGER, D. Y.; SMITH, M. L. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 143, n. 1-2, p. 64-79, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.11.008>>. Acesso em: 08 de agosto de 2016.

JIN, C.; XIAO, X.; MERBOLD, L.; ARNETH, A.; VEENENDAAL, E.; KUTSCH, W. L. Phenology and gross primary production of two dominant savanna woodland ecosystems in Southern Africa. **Remote Sensing of Environment**, v. 135, p. 189-201, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.033>>. Acesso em: 08 de agosto de 2016.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F., MASUOKA, E., WOLFE, R. E., SALEOUS, N., ROY, D. P., MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n.1-2, nov. p 3-15, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6)>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

KANNIAH, K. D.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B.; TAPPER, N. J.; ZHU, X. Evaluation of Collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity product and algorithm improvement at a tropical savanna site in northern Australia. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1808-1822, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.013>>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

KANNIAH, K. D.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B. Environmental controls on the spatial variability of savanna productivity in the Northern Territory, Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 11, p. 1429–1439, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.009>>. Acesso em: 3 de junho de 2015.

KERGOAT, L.; LAFONT, S.; ARNETH, A.; LE DANTEC, V.; SAUGIER, B. Nitrogen controls plant canopy light-use efficiency in temperate and boreal ecosystems, **Journal**

Geophysical Research, v. 113, p. 1–19, 2008. doi:10.1029/2007JG000676. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2007JG000676>>. Acesso em: 4 de junho de 2015.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; F., K. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. 1. ed. Curitiba: FUPEF/Imprensa da UFPR, 2002. p. 251–264.

KILL, L. H. P. **Caracterização da vegetação da reserve legal da Embrapa Semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2017, 25p.

KIRSCHBAUM, M. U. F.; EAMUS, D.; GIFFORD, R. M.; ROXBURGH, S. H.; SANDS, P.J. Definitions of Some Ecological Terms Commonly Used in Carbon Accountig. **NEE workshop proceedings**, p 18-20, abr., 2001. Disponível em: <<http://www.steverox.info/Downloads/Software/C%20Accounting%20Definitions.pdf>>. Acesso em: 04 de junho de 2015.

KNYAZIKHIN, Y.; MARTONCHIK, J. V.; MYNENI, R. B.; DINER, D. J.; RUNNING, S. W. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. **JGR Atmospheres**, v. 103, n. D24, p. 32257-32275, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/98JD02462>> Acesso em: 04 de junho de 2015.

KURC, S. A.; SMALL, E. E. Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico. **Water Resources Research**, v. 40, n. 9, p. 1-15, 2004. doi:10.1029/2004WR00306. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2004WR003068>>. Acesso em: 04 de junho de 2015.

LEAL, I. R. et al. Changing the Course of Biodiversity Conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 701–706, jun. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00703.x>>. Acesso em: 12 de agosto de 2015.

LEUNING, R.; CLEUGH, H. A.; ZEGELIN, S. J.; HUGHES, D. Carbon and water fluxes over a temperate Eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in Australia: Measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, p. 151-173, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.004>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2016.

LIU, W. Y.; LIN, C. C.; SU, K. H. Modelling the spatial forest-thinning planning problem considering carbon sequestration and emissions. **Forest Policy and Economics**, v. 78, p. 51-66, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.002>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2018.

LLOYD J.; TAYLOR J. A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, v. 8, p. 315-323, 1994. Disponível em: <

https://www.jstor.org/stable/2389824?seq=9#metadata_info_tab_contents>. Acesso em: 10 de janeiro de 2016.

MA, X.; HUETE, A.; YU, Q.; RESTREPO-COUBE, N.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B.; KANNIAH, K. D.; CLEVERLY, J.; EAMUS, D. Parameterization of an ecosystem light-use-efficiency model for predicting savanna GPP using MODIS EVI. **Remote Sensing of Environment**, V. 154, P. 253-271, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.025>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2016.

MA, X.; HUETE, A.; YU, Q.; COUBE, N. R.; DAVIES, K.; BROICH, M.; RATANA, P.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B.; CLEVERLY, J.; BOULAIN, N.; EAMUS, D. Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 97-115, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.030>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2016.

MAHAJAN, S.; TUTEJA, N. COLD. Salinity and drought stresses: an overview. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 444, n.2, p.139-158, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018>>. Acesso em: 20 de novembro de 2015.

MARENGO, J.A., CHOU, S.C., KAY, G., ALVES, L.M., PESQUERO, J.F., SOARES, W.R., SANTOS, D.C., LYRA, A.A., SUEIRO, G., BETTS, R.. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Clim. Dyn.** V. 38, p. 1829-1848, 2012. Disponível em: <http://www.pbm.coppe.ufrj.br/es/component/docman/doc_view/217-marengoetal2011>. Acesso em: 20 de novembro de 2015.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/joc.4420>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2017.

MCTI. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 3° ed. Brasília, MCTI, 2016, 85 p.

MENEZES, R., SAMPAIO, E., GIONGO, V., PÉREZ-MARIN, A. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the caatinga biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, p. 643–653, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2016.

MIRANDA, R. Q.; GALVÍNCIO, J. D.; MORAIS, Y. C. B.; MOURA, M. S. B.; JONES, C. A. DINÂMICA DO DESMATAMENTO DE FLORESTA SECA NA BACIA DO PONTAL NO BRASIL. **Revista Caatinga [online]**, v. 31, n. 2, p. 385-395, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n215rc>> Acesso em: 10 de julho de 2018.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p. 747-766, 1972. doi:10.2307/240190. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2401901?seq=8#metadata_info_tab_contents>. Acesso em: 21 de janeiro de 2016.

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, 585-599, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786324007>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2018.

MUNGER, J.W.; NOORMETS, A.; OECHEL, W.C.; PAW, K.T.; SCHMID, H.P.; STARR, G.; TORN, M.S.; WOFSEY, S.C. A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and AmeriFlux data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 3, p. 576–591, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.013>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2016.

MYNENI, R. B.; HOFFMAN, S.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J. L.; GLASSY, J.; TIAN, Y.; WANG, Y.; SONG, X.; ZHANG, Y.; SMITH, G. R.; LOTSCH, A.; FRIEDL, M.; MORISSETTE, J. T.; VOTAVA, P.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 214-231, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3)> Acesso em: 12 de fevereiro de 2016.

NASA. **MODIS Web**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 25 abril 2016

OLOFSSON, P.; LAGERGREN, F.; LINDROTH, A.; LINDSTRÖM, J.; KLEMEDTSSON, L.; KUTSCH, W.; EKLUNDH, L. Towards operational remote sensing of forest carbon balance across Northern Europe. **Biogeosciences**, v. 5, n. 3, p. 817–832, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/bg-5-817-2008>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2016.

PRADO, D. E. As Caatingas da América do Sul. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Eds.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003. p. 3–76.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção 3 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <<http://mapbiomas.org/map#coverage>>. Acesso em 12 de novembro de 2018.

RAHMAN, A. F.; SIMS, D. A.; CORDOVE, V. D.; EL-MARSRI, B. Z. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 19, L19404, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2005GL024127>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2016.

REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1424-1439, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2016.

REICHSTEIN, M.; BAHN, M.; CIAIS, P.; FRANK, D.; MACHECHA, M. D.; SENEVIRATNE, S. I.; ZSCHEISCHLER, J.; BEER, C.; BUCHMANN, N.; FRANK, D. C.; PAPALE, D.; RAMMING, A.; SMITH, P.; THONICKE, K.; VAN DER VELDE, M.; VICCA, S.; WALZ, A.; WATTENBACH, M. Climate extremes and the carbon cycle. **Nature**, v. 500, p. 287-295, 2013. doi: 10.1038/nature12350. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature12350>>. Acesso em 22 de janeiro de 2017.

RIBEIRO, K.; SOUSA-NETO, E. R.; CARVALHO JUNIOR, J. A.; LIMA, J. R. S.; MENEZES, R. S. C.; DUARTE-NETO, P. J.; GUERRA, G. S.; OMETTO, J. P. H. B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1048-1057, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2017.

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3, 1973, Washington. **Proceedings**. Washington: NASA, p. 309-317, 1974. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2016.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2H.006>>. Acesso em: 07 de julho de 2016.

RUNNING, S. W.; ZHAO, M. User's Guide. Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products. **NASA EOS MODIS Land Algorithm**. Version 3.0. Colletion 6. 2015. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hv006/>>. Acesso em 07 de julho de 2016.

RUNNING, S. Q. M. **MOD17A3H MODIS/Terra Net Primary Production Yearly L4 Global 500m SIN Grid V006**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/modis/mod17a3h.006>>. Acesso em 07 de julho de 2016.

SABINO, F. G. da S.; CUNHA, M. C. L.; SANTANA, G. M. Estrutura da Vegetação em Dois Fragmentos de Caatinga Antropizada na Paraíba. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 487-497, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.017315>>. Acesso em: 10 de maio de 2019.

SANTOS, J. C. et al. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 276–286, 2011. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/194008291100400306>>. Acesso em: 22 de agosto de 2015.

SCHACHTMAN, D. P.; GOODGER, J. Q. D. Chemical root to shoot signaling under drought. **Trends in Plant Science**, v. 13, n. 6, p; 281-287, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.04.003>>. Acesso em: 20 de novembro de 2017.

SCHAEFFER, M.; EICKHOUT, B.; HOOGWIK, M.; STRENGERS, B.; VAN VUUREN, D.; LEEMANS, R.; OPSTEEGH, T. CO₂ and albedo climate impacts of extratropical carbon and biomass plantations. **Global Biogeochemical Cycles**, Washigton, v. 20, n. 2, p. 1-15, 2006. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GB002581>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2016.

SCHAEFER, K.; SCHAWALM, C. R.; WILLIAMS, C.; ARAIN, M. A.; BARR, A.; CHEN, J. M.; DAVIS, K. J. et al. A model-data comparison of gross primary productivity: Results from the North American Carbon Program site synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, p. 1-15, jul. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2012JG001960>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

SCHULZ, C.; KOCH, R.; CIERJACKS, A.; KLEINSCHMIT, B. Land change and loss of landscape diversity at the Caatinga phytogeographical domain e Analysis of pattern-process relationships with MODIS land cover products (2001-2012). **Journal of Arid Environments**, V. 136, P. 54-74, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.10.004>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2018.

SHI, H.; EAMUS, D.; HUETE, A.; CLEVERLY, J.; TIAN, X.; YU, Q.; WNAG, S.; MONTAGNANI, L.; MAGLIULO, V.; ROTENBERG, E.; PAVELKA, M.; CARRARA, A. Assessing the ability of MODIS EVI to estimate terrestrial ecosystem gross primary production of multiple land cover types. **Ecological Indicators**, v. 72, jan., p. 153-164, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.022>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2018.

SHIM, C.; HONG, J.; HONG, J.; KIM, Y.; KANG, M.; THAKURI, B. M.; KIM, Y.; CHUN, J. Evaluation of MODIS GPP over a complex ecosystem in East Asia: A case study at Gwangneung flux tower in Korea. **Advances in Space Research**, v. 54, p. 2296-2308, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.031>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2017.

SILVA, B. B. DA. Estimativa de sequestro de carbono por sensoriamento remoto. In: GALVÍNCIO, J. D. (Ed.). **Mudanças climáticas e modelo ambientais: caracterização e aplicações**. Recife, BRA: Editora Universitária da UFPE, 2012. p. 51–70.

SILVA, B. B.; GALVÍNIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado de São Gonçalo – PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, 57-64, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000100006>> Acesso em: 13 de maio de 2015.

SILVA, P. F.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2018.

SIMS, D. A.; RAHMAN, A. F.; CORDOVA, V. D.; EL-MASRI, B. Z.; BALDOCCHI, D.D.; FLANAGAN, L. B.; GOLDSTEIN, A. H.; HOLLINGER, D. Y.; MISSON, L.; MONSON, R. K.; OECHEL, W. C.; SCHMID, H. P.; WOFSY, S. C.; XU, L. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n.G4, G04015, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2006JG000162>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2017.

SJÖSTRÖM, M.; ZHAO, M.; ARCHIBALD, S et al. Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using eddy covariance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 131, p. 275–286, abr. 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.023>>. Acesso em: 13 de maio de 2015.

SJÖSTRÖM, M.; ARDÖ, J.; ARNETH, A.; BOULAIN, N.; CAPPELAERE, B.; EKLUNDH, L.; GRANDCOURT, A.; KUTSCH, W. L.; MERBOLD, L.; NOUVELLON, Y.; SCHOLLES, R. J.; SCHUBERT, P.; SEAQUIST, J.; VEENENDAAL, E. M. Exploring the potential of MODIS EVI for modeling gross primary production across African ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n.4, p. 1081–1089, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.013>>. Acesso em: 13 de maio de 2015.

SOUZA, B. I.; MENEZES, R.; ARTIGAS, R. C. Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil. **Investigaciones Geográficas**, Boletín del Instituto de Geografía, n. 88, pp. 45-59, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.14350/ig.44092>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2017.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 50, n. 8, p. 627-636, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000800001>>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2017.

SOUZA, M. J. N.; OLIVEIRA, V. P. V. OS ENCLAVES ÚMIDOS E SUB-ÚMIDOS DO SEMI-ÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO. **Mercator**, v. 5, n. 9, nov. 2008. Disponível em: <<http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/91>>. Acesso em: 10 de maio de 2019.

SPRINTSIN, M.; CHEN, J. M.; DESAI, M.; GOUGH, C. M. Evaluation of leaf-to-canopy upscaling methodologies against carbon flux data in North America. **JGR Biogeosciences**, v. 117, n. G1, p. 1-17, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2010JG001407>>. Acesso em: 14 de junho de 2017.

TABARELLI, M.; SANTOS, A.M.M. 2004. Uma breve descrição sobre a história natural dos brejos nordestinos. Pp. 99-110. In: PÔRTO, K.C.; CABRAL, J.J.P.; TABARELLI, M. (orgs.): **Brejos de Altitude em Pernambuco e Paraíba: História Natural, ecologia e conservação**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente.

TAGESSON, T.; ARDO J.; CAPPELAERE BERNARD, K. L.; ABDI, A.; HORION, S.; FENSHOLT, R. Modelling spatial and temporal dynamics of gross primary production in the Sahel from earth-observation-based photosynthetic capacity and quantum efficiency. **Biogeosciences**, v. 14, n. 5, p. 1333-1348, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/bg-14-1333-2017>>. Acesso em: 12 de março de 2018.

TEIXEIRA, A. H. C.; SCHERER-WARREN, M.; HENANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F. Large-Scale Water Productivity Assessments with MODIS Images in a Changing Semi-Arid Environment: A Brazilian Case Study. **Remote Sensing**, v. 5, p. 5783-5804, 2013. doi:10.3390/rs5115783. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/971815/large-scale-water-productivity-assessments-with-modis-images-in-a-changing-semi-arid-environment-a-brazilian-case-study>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

TEIXEIRA, A. H. C.; SHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. Water productivity assessment by using MODIS images and agrometeorological data in the Petrolina municipality, Brazil. **Proceedings of SPIE**, v. 8531, 2012. DOI: 10.1117/12.974376. Disponível em: <http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/water_productivity.pdf>. Acesso em 10 de janeiro de 2018.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertication trends in the Northeast of Brazil over fi the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>>. Acesso em: 8 de maio de 2018.

TROVÃO, D. M. B. M.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A.; DANTAS NETO, J. D. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de**

Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.3, p. 307-311, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000300010>>. Acesso em: 15 de junho de 2015.

TURNER, E. P.; RITTS, W.; COHEN, W. B.; GOWER, S. T.; RUNNING, S. W.; ZHAO, M.; COSTA, M. H.; KIRSCBAUM, A. A.; HAM, J. M.; SALESKA, S. R.; AHL, D. E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, p. 282-292, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.017>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2016.

USGS. United States Geological Survey. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 25 julho de 2017.

VERMA, M.; FRIEDL, M. A.; LAW, B. E.; BONAL, D.; KIELY, G.; BLACK, T. A.; WOHLFAHRT, G.; MOORS, E. J.; MONTAGNANI, L.; MARCOLLA, B.; TOSCANO, P.; VARLAGIN, A.; ROUPSARD, O.; CESCATTI, A.; ARAIN, M. A.; D'ODORICO, P. Improving the performance of remote sensing models for capturing intra- and inter-annual variations in daily GPP: An analysis using global FLUXNET tower data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214-215, p. 416-429, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.005>>. Acesso em: 30 de março de 2016.

VERMOTE, E. MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V006. **NASA EOSDIS LP DAAC**, 2015. doi: 10.5067/MODIS/MOD09A1.006. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod09a1v006/>>. Acesso em: 12 de setembro de 2017.

VIEIRA, R.M.S.P., TOMASELLA, J., ALVALÁ, R.C.S., SESTINI, M.F., AFFONSO, A.G., RODRIGUEZ, D.A., et al. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 347–360, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>>. Acesso em: 14 de julho de 2017.

WANG, L.; ZHU, H.; LIN, A.; ZOU, L.; QIN, W.; DU, Q. Evaluation of the latest MODIS GPP products across multiple biomes using global eddy covariance flux data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 418, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs9050418>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2018.

WATANABE, M.D.B., ORTEGA, E. Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: valuation of water, carbon and nitrogen processes. **Environmental Science & Policy**, v. 14, p. 594–604, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.013>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2016.

XIAO, J.F.; ZHUANG, Q.L.; LAW, B.E.; CHEN, J.Q.; BALDOCCHI, D.D.; COOK, D.R.; OREN, R.; RICHARDSON, A.D.; WHARTON, S.; MA, S.Y.; MARTIN, T.A.; VERMA, S.B.; SUYKER, A.E.; SCOTT, R.L.; MONSON, R.K.; LITVAK, M.; HOLLINGER, D.Y.; SUN, G.; DAVIS, K.J.; BOLSTAD, P.V.; BURNS, S.P.; CURTIS, P.S.; DRAKE, B.G.;

FALK, M.; FISCHER, M.L.; FOSTER, D.R.; GU, L.H.; HADLEY, J.L.; KATUL, G.G.; ROSER, Y.; MCNULTY, S.; MEYERS, T.P.;

XIAO, X.; HOLLINGER, D.; ABER, J.; GOLTZ, M.; DAVIDSON, E. A.; ZHANG, Q.; MOORE III, B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p. 519-534, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>>. Acesso em: 10 de agosto de 2017.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; SALESKA, S.; HUTYRA, L.; CAMARGO, P.; WOFSY, S.; FROLKING, S.; BOLES, S.; KELLER, M.; MOORE III, B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 1, p. 105-122, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.015>>. Acesso em: 10 de agosto de 2017.

YAN, H.; WANG, S.; BILLESBACH, D.; OECHEL, W.; BOHRER, G.; MEYERS, T.; MARTIN, T. A.; MATAMALA, R.; PHILIPS, R. P.; RAHMAN, F.; YU, Q.; SHUGART, H. H. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants. **Ecological Modelling**, v. 297, p. 42-59, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.11.002>>. Acesso em: 10 de agosto de 2017.

YANG, W.; HUANG, D.; TAN, B.; STROEVE, J. C.; SHABANOV, N. V.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Analysis of Leaf Area Index and Fraction of PAR Absorbed by Vegetation Products From the Terra MODIS Sensor: 2000–2005. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, v. 44, n. 7, p. 1829-1841, 2006. DOI: 10.1109/TGRS.2006.871214. Disponível em: <<http://sites.bu.edu/cliveg/files/2013/12/ywze01.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro de 2017.

YUAN, W.; LIU, S.; ZHOU, G.; ZHOU, G.; TIESZEN, L. L.; BALDOCCHI, D.; BERNHOFER, C.; GHOLZ, H.; GOLDSTEIN, A. H.; GOULDEN, M. L.; HOLLINGER, D. Y.; HU, Y.; LAW, B. E.; STOY, P. C.; VESALA, T.; WOFSY, S. C. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 143, n. 3-4, p. 189-207, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.001>>. Acesso em: 11 de junho de 2017.

ZHANG, L.; WYLIE, B.; LOVELAND, T.; FOSNIGHT, E.; TIESZEN, L. L.; GILMANOV, T. Evaluation and comparison of gross primary production estimates for the Northern Great Plains grasslands. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 2, p. 173–189, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.012>>. Acesso em: 24 de novembro de 2016.

ZHANG, F.; CHEN, J. M.; CHEN, J.; GOUGH, C. M.; MARTIN, T. A.; DRAGONI, D. Evaluating spatial and temporal patterns of MODIS GPP over the conterminous U.S. against

flux measurements and a process model. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, set., p. 717–729, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.023>>. Acesso em: 15 de agosto de 2015.

ZHANG, Y.; XIAO, X.; ZHOU, S.; CIAIS, P.; MCCARTHY, H.; LUO, Y. Canopy and physiological controls of GPP during drought and heat wave. **Geophysical Research Letters**, v. 43, p. 3325–3333, 2016a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2016GL068501>>. Acesso em: 14 de junho de 2017.

ZHANG, Y.; XIAO, X.; GUANTER, L.; ZHOU, S. Z.; CIAIS, P.; JOINER, J.; SITCH, S.; WU, X.; NABEL, J.; DONG, J.; KATO, E.; JAIN, A. K.; WILTSHIRE, A.; STOCKER, B. D. Precipitation and carbon-water coupling jointly control the interannual variability of global land gross primary production. **Scientific Reports**, v. 6, 39748, 2016b. DOI: 10.1038/srep39748. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/srep39748>>. Acesso em: 14 de junho de 2017.

ZHANG, Y.; XIAO, X.; WU, X.; ZHOU, S.; ZHANG, G.; QIN, Y.; DONG, J. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. **Scientific Data**, v. 4, p. 1-13, 2017. DOI: 10.1038/sdata.2017.165. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/sdata2017165>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2018.