
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

GABRIEL SIQUEIRA TAVARES FERNANDES

**BALANÇO DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA POR
SENSORIAMENTO REMOTO EM FLORESTA TROPICAL
SAZONALMENTE SECA NO NORDESTE BRASILEIRO**

Recife-PE

2021

GABRIEL SIQUEIRA TAVARES FERNANDES

BALANÇO DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA POR
SENSORIAMENTO REMOTO EM FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE
SECA NO NORDESTE BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Autor: Gabriel Siqueira Tavares Fernandes, Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

Recife-PE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F363gb Fernandes, Gabriel Siqueira Tavares
BALANÇO DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA POR SENSORIAMENTO REMOTO EM
FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA NO NORDESTE BRASILEIRO / Gabriel Siqueira Tavares
Fernandes. - 2021.
69 f. : il.

Orientador: Fabricio Marcos Oliveira Lopes.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, Recife, 2021.

1. Landsat. 2. Caatinga. 3. IBVL. 4. MapBiomias. I. Lopes, Fabricio Marcos Oliveira, orient. II. Título

CDD 630

GABRIEL SIQUEIRA TAVARES FERNANDES

BALANÇO DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA POR
SENSORIAMENTO REMOTO EM FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE
SECA NO NORDESTE BRASILEIRO

Dissertação defendida e aprovada em 23 de fevereiro de 2021 pela banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

Examinadores:

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura

Dra. Rochele Sheila Vasconcelos

Aos meus pais, sobretudo minha mãe Fabiana, que é minha maior apoiadora;
Aos meus irmãos, por todo apoio e compreensão;
À Vynicius, meu companheiro de todas as horas e quem eu posso contar sempre;
Aos meus amigos da Pós que sempre lutaram junto comigo nessa caminhada;
Aos meus amigos, que mesmo à distância não deixaram de fazer parte dessa conquista;

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal Rural de Pernambuco que me abrigou proporcionando aprendizados que levarei para o restante de minha vida pessoal e profissional;

Ao Professor Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes, o qual tenho muita admiração, por ter aceitado me conduzir por todo processo, por sua paciência, por todo apoio e ensinamentos passados;

À CAPES pela concessão da bolsa para a execução deste trabalho;

A minha mãe Fabiana, por me apoiar em todas minhas decisões, por me dar forças e inspiração constantemente. Por ser meu exemplo de vida e por seu amor incondicional.

À Vynicius, por toda parceria, companheirismo, incentivo e por estar do meu lado em todos os momentos;

Aos meus amigos da pós que levarei para a vida, Kenny, Victor, Daniela, Renato, Camila, Anderson, Francisco e os demais por toda amizade e parceria construída nesses dois anos;

A todos os professores que colaboraram com a minha formação acadêmica, pelos conselhos dados em sala de aula, por estarem sempre dispostos a nos ajudar.

E por fim, a mim mesmo, por nunca ter desistido daquilo que acredito, por ser forte mesmo nesses tempos ruins e por ter conseguido concluir esta etapa tão almejada.

Sumário

LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	11
1. Introdução.....	14
2. Objetivos	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. Revisão Bibliográfica.....	17
3.1. Radiação Fotossinteticamente Ativa.....	17
3.2. Bioma Caatinga.....	20
3.3. Balanço de radiação em coberturas vegetais	25
3.4. Sensoriamento Remoto	27
4. Material e Métodos.....	31
4.1. Caracterização da área de estudo	31
4.2. Dados meteorológicos.....	32
4.3. Dados orbitais	33
4.4. Etapas de processamento	34
4.4.1. Refletância Monocromática.....	34
4.4.2. Albedo planetário	35
4.4.3. Albedo da superfície.....	36
4.4.4. Índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF).....	36
4.4.5. Radiação de onda curta incidente	37
4.5. Balanço de Radiação fotossinteticamente ativa.....	37
4.5.1. PAR refletida (solo + vegetação)	38
4.5.2. PAR interceptada.....	38
4.5.3. PAR absorvida.....	38
4.5.4. PAR transmitida	39
4.5.5. PAR refletida pelo solo e absorvida pela vegetação.....	39
4.6. Regressão polinomial.....	39
4.7. Classificação da vegetação	40
5. Resultados e Discussão	42
5.1. Cobertura vegetal.....	42
5.2. Balanço de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR)	46
6. Conclusões	62
7. Sugestões.....	63
8. Referência bibliográficas.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos satélites Landsat 5 e 8.	28
Tabela 2. Dados meteorológicos disponíveis referentes às datas das imagens do Landsat-5 e Landsat-8.....	32
Tabela 3. Imagens obtidas nos satélites Landsat 5 e Landsat 8.....	33
Tabela 4. Coeficiente de correlação de Pearson.....	39
Tabela 5. Classificação da vegetação segundo o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa e o NDVI.....	36
Tabela 6. Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) obtida na estação meteorológica automática do INPE, Petrolina, Pernambuco (PARObs) e estimada via satélite Landsat 5 e 8. (PARest).....	46
Tabela 7. Coeficientes da equação do modelo polinomial de segunda ordem ($ax^2 + bx + c$), coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de correlação de Pearson (r) obtidos entre o Índice de Área Foliar (IAF) e os componentes de e os componentes do balanço da PAR, Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida (PARa), refletida (PARr), refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior da vegetação (PARra) e transmitida (PARt), nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, no Vale do Submédio São Francisco.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro solar e sua relação com o espectro de absorção da clorofila.....	17
Figura 2. Localização do bioma Caatinga no Brasil e sua dimensão em relação ao semiárido brasileiro.....	19
Figura 3. Classes de vegetação: a) Caatinga arbórea, b) Caatinga arbórea arbustiva, c) Arbórea subarbórea densa, d) Subarbórea arbustiva densa, e) Caatinga arbustiva, f) Arbustiva subarbustiva aberta, g) Arbustiva subarbustiva aberta, h) Subarbustiva arbustiva rala, i) Subarbustiva arbustiva muito rala.....	24
Figura 4. Distribuição da PAR incidente em vegetação.....	25
Figura 5. Refletância espectral de alvos naturais.....	27
Figura 6. Mapa de cobertura da vegetação e do uso do solo na área de estudo, região do Vale do Submédio São Francisco.....	30
Figura 7. Declividade do terreno no Vale do Submédio São Francisco derivada do Modelo digital de elevação do sensor ASTER/Terra com resolução espacial de 30m.....	31
Figura 8. Distribuição espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	40
Figura 9. Precipitação diária mensal (a) e acumulada no mês anterior à data de passagem do satélite (b) no município de Petrolina, Pernambuco.....	41
Figura 10. Distribuição espacial do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	42
Figura 11. Distribuição espacial do Índice de Área Foliar (IAF) no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	43
Figura 12. Classificação da vegetação no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	44
Figura 13. Distribuição da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	45
Figura 14. Distribuição espacial do albedo de superfície no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	47

Figura 15. Variação do albedo de superfície médio em função da classificação da cobertura vegetal no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	48
Figura 16. Distribuição da fração refletida (PARr) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, em duas unidades de medida (Wm^{-2} e porcentagem - %).....	49
Figura 17. Distribuição da fração absorvida (PARa) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, em duas unidades de medida (Wm^{-2} e porcentagem - %).....	50
Figura 18. Distribuição da fração transmitida (PART) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, em duas unidades de medida (Wm^{-2} e porcentagem - %).....	51
Figura 19. Distribuição da fração refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior da vegetação (PARra) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, em duas unidades de medida (Wm^{-2} e porcentagem - %).....	52
Figura 20. Modelo polinomial de segunda ordem entre o Índice de Área Foliar (IAF) e os componentes do balanço da PAR, Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida (PARa), refletida (PARr), refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior da vegetação (PARra) e transmitida (PART), nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, no Vale do Submédio São Francisco.....	54
Figura 21. Fracionamento médio da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) em áreas de vegetação natural de acordo com o IBVL no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	56
Figura 22. Fracionamento médio da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) em classes de uso e cobertura do solo obtidas do MapBiomas no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission e Reflection Radiometer</i>
DAS	<i>Dia Sequencial do Ano</i>
DJ	<i>Dia Juliano</i>
dr	<i>Inverso do quadrado da distância Terra-Sol.</i>
E	<i>Elevação solar</i>
IAF	<i>Índice de área foliar ($m^{-2} m^{-2}$)</i>
IBVL	<i>Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa</i>
INMET	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
LANDSAT	<i>MSS Land Remote Sensing Satellite Multispectral Scanner System</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
P	<i>pressão atmosférica</i>
PAR	<i>Radiação Fotossinteticamente Ativa</i>
PARa	<i>Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida</i>
PARr	<i>Radiação Fotossinteticamente Ativa refletida</i>
PARra	<i>Radiação Fotossinteticamente Ativa refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior da vegetação</i>
PART	<i>Radiação Fotossinteticamente Ativa transmitida</i>
r	<i>Coefficiente de correlação de Pearson</i>
R ²	<i>Coefficiente de determinação</i>
R _g	<i>Radiação solar global</i>
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SRTM	<i>Modelo de elevação digital da região</i>
T _a	<i>Temperatura do ar</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
UR	<i>Umidade relativa do ar</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTC	<i>Unidade de Tempo Central.</i>
W _d	<i>Direção do vento</i>
W _s	<i>Velocidade do vento</i>
Z	<i>Ângulo zenital</i>
α _{sup}	<i>Albedo da superfície corrigido</i>
α _{toa}	<i>Albedo planetário</i>

Fernandes, G. S. T. Balanço de radiação fotossinteticamente ativa por sensoriamento remoto em Floresta Tropical Sazonalmente Seca no Nordeste brasileiro. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.

Autor: Gabriel Siqueira Tavares Fernandes
Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

RESUMO: A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é essencial ao desenvolvimento vegetal. Ao atingir a superfície, essa radiação pode sofrer processos de reflexão, absorção e transmissão e a quantificação desses fracionamentos é de expressiva importância, tendo em vista o entendimento de processos radiativos da superfície da Terra. Dessa forma, o principal objetivo deste trabalho foi caracterizar o fracionamento da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e sua interação com a cobertura vegetal de uma porção de Floresta Tropical Sazonalmente Seca no final da estação chuvosa no Nordeste do Brasil. O uso e a cobertura da vegetação foram classificados segundo o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL) e o MapBiomas (coleção 5) para avaliar a contribuição dos componentes do balanço da PAR. Também foram correlacionados o índice de área foliar com cada componente do balanço de radiação PAR para encontrar os melhores modelos de ajuste. Empregou-se modelos polinomiais de segunda ordem para identificar a relação existente entre os componentes da PAR e o IAF. A região estudada abrangeu os municípios de Petrolina, Juazeiro, Lagoa Grande e Curaçá, localizadas nos estados da Bahia e Pernambuco. As imagens foram provenientes dos satélites Landsat-5 e Landsat-8, entre os anos de 2009 a 2019, sendo uma imagem por ano, obtida no final do período chuvoso da região, considerando a cobertura de nuvens menor que 10%. O processamento digital foi realizado no Software QGIS 3.6.2 para obter os índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) e o balanço da radiação PAR. Os dados de superfície foram obtidos nas estações meteorológicas do Instituto de Pesquisas Espaciais e do Instituto Nacional de Meteorologia localizada na cidade de Petrolina, Pernambuco. Observou-se que o fracionamento da radiação da PAR refletida, absorvida, transmitida e refletida pelo solo e absorvida pelo dossel variou de acordo com a classe de uso e cobertura vegetal. Além disso, à medida que a densidade da vegetação aumentava ocorria um decréscimo na PAR transmitida e refletida e, um aumento na PAR absorvida e na PAR refletida pelo solo e absorvida pelo dossel, em todas as datas analisadas. Constatou-se, ainda, que áreas vegetadas apresentaram um maior aproveitamento de radiação PAR (maior absorção) em relação às outras áreas como as de infraestrutura urbana. A vegetação do Vale do São Francisco possui grande heterogeneidade e, conseqüentemente, tem-se uma complexa relação com a distribuição da radiação fotossinteticamente ativa na superfície.

Palavras-chave: Landsat-8, Caatinga, IBVL, MapBiomas

Fernandes, G. S. T. Balance of photosynthetically active radiation by remote sensing in Seasonally Dry Tropical Forest in Northeast Brazil. 2021. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) - Federal Rural University of Pernambuco – UFRPE.

Author: Gabriel Siqueira Tavares Fernandes
Advisor: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

ABSTRACT: Photosynthetically active radiation (PAR) is essential for plant development. Upon reaching the surface, this radiation can undergo processes of reflection, absorption and transmission and the quantification of these fractionations is of significant importance, in view of the understanding of radiative processes on the Earth's surface. Thus, the main objective of this work was to characterize the fractionation of Photosynthetically Active Radiation (PAR) and its interaction with the vegetation cover of a portion of Seasonally Dry Tropical Forest at the end of the rainy season in Northeast Brazil. Vegetation use and coverage were classified according to the Woody Vegetation Biomass Index (IBVL) and MapBiomass (collection 5) to assess the contribution of the PAR balance sheet components. The leaf area index was also correlated with each component of the PAR radiation balance to find the best fit models. Second order Polynomial models were used to identify the relationship between the PAR components and the IAF. The studied region covered the municipalities of Petrolina, Juazeiro, Lagoa Grande and Curaçá, located in the states of Bahia and Pernambuco. The images came from the Landsat-5 and Landsat-8 satellites, between the years 2009 to 2019, being one image per year, obtained at the end of the region's rainy season, considering the cloud cover below 10%. Digital processing was performed using the QGIS 3.6.2 Software to obtain the vegetation indices (NDVI, SAVI and IAF) and the PAR radiation balance. The surface data were obtained from the meteorological stations of the Institute for Space Research and the National Institute of Meteorology located in the city of Petrolina, Pernambuco. It was observed that the fractionation of the reflected PAR radiation, absorbed, transmitted and reflected PAR by the soil and absorbed by the canopy varied according to the class of use and vegetation cover. In addition, as the density of vegetation increased, there was a decrease in transmitted PAR and reflected PAR and an increase in absorbed PAR and reflected PAR by the soil and absorbed by the canopy, on all the dates analyzed. It was also found that vegetated areas showed greater use of PAR radiation (greater absorption) compared to other areas such as urban infrastructure. The vegetation of the São Francisco Valley has great heterogeneity and, consequently, there is a complex relationship with the distribution of photosynthetically active radiation on the surface.

Keywords: Landsat-8, Caatinga, IBVL, MapBiomass.

1. Introdução

A radiação solar com comprimentos de onda entre 400 a 700 nm é denominada Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR do inglês *Photosynthetically Active Radiation*), justamente pelo seu poder fotossintetizante, é imprescindível ao crescimento e desenvolvimento vegetal, sendo uma das variáveis de entrada em modelos que simulam o acúmulo de matéria seca durante o ciclo das culturas (TEI et al., 1996). Ao atingir uma superfície vegetada (dossel) essa radiação pode ser absorvida, refletida e transmitida em proporções distintas dependendo da variação do ângulo zenital do Sol e de fatores inerentes à vegetação como estágio fenológico, tamanho e arquitetura foliar (PEREIRA et al., 2002).

O conhecimento da distribuição espacial e temporal da PAR em um dossel vegetativo é fundamental para compreensão de processos de captura e de fixação de radiação solar pela biomassa verde, além de ser uma base importante para a compreensão dos efeitos locais e regionais das mudanças na cobertura vegetal nos processos do ecossistema (PARKER et al., 2005). Este balanço de radiação se dá pela caracterização de seus componentes, a fração refletida pelo dossel (RPAR), refletida pelo solo (RPARs), absorvida pelo dossel (APAR) e transmitida através do dossel (TPAR) (GALLO & DAUGHTRY, 1986).

A determinação desse regime radiativo em áreas de vegetação natural, como na Floresta Tropical Sazonalmente Seca, por exemplo a Caatinga, é extremamente complexa, principalmente porque esse bioma apresenta elevada heterogeneidade em sua fitofisionomia por sua alta diversidade de espécies (VASCONCELOS et al., 2017), o que ocasiona uma alta variação na densidade e distribuição da vegetação.

A Caatinga encontra-se em 60% do Nordeste Brasileiro e constitui uma vegetação típica do Semiárido, o qual configura-se como uma região quente, seca e de elevada evapotranspiração (MDR, 2018). Este bioma agrega 5.344 espécies de plantas sendo que 318 delas são endêmicas e, em sua maioria, são características de florestas arbóreas e arbustivas, com comportamento caducifólio ou xerofítico (LOIOLA et al., 2012).

Deste fato resulta a importância de se realizar estudos ambientais em toda a extensão da Caatinga, para que seja possível conhecer melhor o complexo funcionamento deste bioma, visando a um desenvolvimento sustentável (SÃO THIAGO et al., 2007). Para compreender a influência do desmatamento sobre o clima semiárido é extremamente importante estudar o balanço de radiação à superfície (LOPES et al., 2013).

Adicionalmente, o conhecimento da interação da vegetação com a PAR fornece subsídio para o entendimento de variações do balanço de carbono à superfície, caracterização do crescimento de espécies, produtividade de um ecossistema, acúmulo de biomassa, dentre outros (CARON et al., 2012; WANG et al., 2010; SILVA et al., 2013; WANG et al., 2014).

Uma das limitações nos estudos que envolvem o balanço de radiação à superfície é a necessidade de instrumentação meteorológica. Essa metodologia abrange uma implantação onerosa, principalmente, em situações de escala regional (GUSMÃO et al., 2012). Nesse sentido, a estimativa desses componentes via sensoriamento remoto surge como uma alternativa eficaz e econômica (MACHADO et al., 2014). A utilidade operacional dessa agregação depende das formulações empregadas, da qualidade e da disponibilidade dos dados meteorológicos e orbitais (LOPES et al., 2013).

Além disso, ressalta-se a relevância da execução de trabalhos desta natureza, tendo em vista a sua escassez na literatura, sobretudo com a utilização de sensoriamento remoto e na área em estudo. Portanto, há contribuições imprescindíveis nesses estudos no que se refere ao conhecimento científico da interação solo-planta-atmosfera, a importância da presença da vegetação natural nos processos radiativos da superfície, e na formulação de políticas ambientais e climáticas que visem a preservação do bioma.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Caracterizar o fracionamento da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e sua interação com a cobertura vegetal em áreas de Floresta Tropical Sazonalmente Seca no final da estação chuvosa no Nordeste do Brasil.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Analisar o comportamento espaço-temporal dos parâmetros biofísicos e dos componentes do balanço de radiação PAR;
- ✓ Relacionar as classes de uso e cobertura vegetal obtidas pelo índice de biomassa da vegetação lenhosa e MapBiomass com as componentes do balanço de radiação PAR;
- ✓ Analisar a correlação entre os componentes do balanço de radiação PAR e o índice de área foliar.
- ✓ Testar ajustes de modelos polinomiais entre o IAF e os componentes do balanço da PAR;

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Radiação Fotossinteticamente Ativa

Antes de interagir com a atmosfera, a radiação solar pode ser fracionada, de um ponto de vista agrônômico, em três faixas principais. Estas podem ser classificadas como as radiações ultravioleta (UV), que possuem comprimento de onda menor que 400 nm e alto poder biocida; as radiações visíveis ou fotossinteticamente ativas (comprimentos de onda de 400 a 700 nm) com seu potencial fotossintetizante; as radiações do infravermelho próximo (comprimentos de onda entre 700 e 3000 nm), as quais são utilizadas em processos morfogênicos pelas plantas (PEREIRA et al., 2002).

Ao incidir no topo da atmosfera, considerando as faixas mencionadas, cerca de 9% da irradiância solar corresponde a radiação UV, 40% de radiação fotossinteticamente ativa e 51% na banda do infravermelho próximo (PEREIRA et al., 2002). Segundo os mesmos autores, ao sofrer interferência atmosférica, as bandas de UV e infravermelho próximo são significativamente absorvidas pelos constituintes atmosféricos, dessa forma, ao atingir a superfície, a maior proporção de radiação refere-se à banda do visível.

A radiação solar que pode ser captada ou absorvida pelas plantas para realizarem processos bioquímicos é denominada de Radiação Fotossinteticamente Ativa-PAR. Essa irradiância provê a energia necessária aos processos associados à fotossíntese, instigando a produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, o crescimento e desenvolvimento das plantas (COCKSHULL, 1992), bem como a produção de biomassa (MONTEIRO, 2009). Além disso, ela pode ser expressa tanto na forma de energia (Wm^{-2}) quanto na forma de fótons ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) (TAIZ & ZEIGER, 2017).

Nas plantas, para a transformação da energia térmica do Sol em energia química, a PAR é absorvida por pigmentos fotossintetizantes, a clorofila e os carotenoides. A clorofila é o principal mecanismo de absorção de energia e o faz preferivelmente nas bandas do azul e do vermelho da PAR (Figura 1).

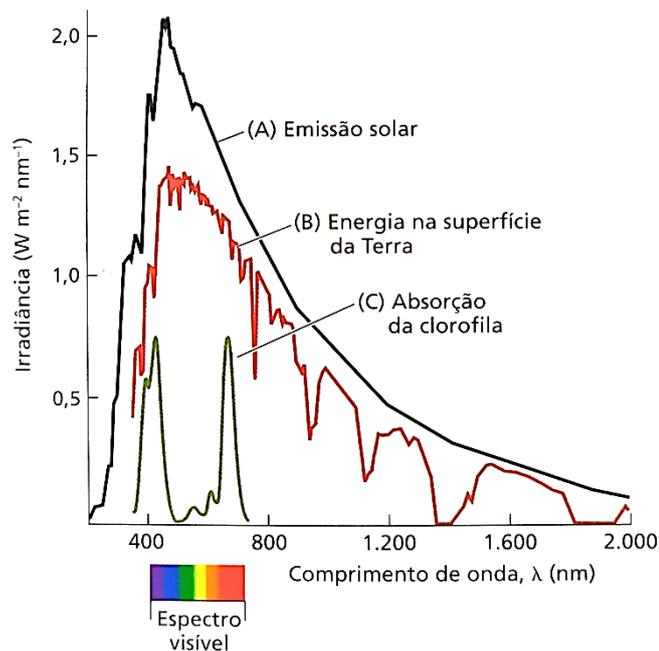


Figura 1. Espectro solar e sua relação com o espectro de absorção da clorofila. (Adaptado de TAIZ & ZEIGER, 2017)

A fotossíntese é um dos processos bioquímicos mais importantes do Reino *Plantae* e é o único de importância biológica capaz de aproveitar a energia solar. Os organismos fotossintetizantes utilizam deste meio para formação de grandes compostos carbonados, sobretudo açúcares, mediante utilização de energia solar para oxidação da água, liberando, assim, oxigênio e reduzindo o dióxido de carbono (KERBAUY, 2012).

Quando estão em estado de suprimento adequado de água, nutrientes e ainda livre de injúrias ocasionadas por pragas, a produção de biomassa é moderada pela radiação solar disponível (MONTEITH, 1965). Vale salientar que somente 5% da radiação total incidente na superfície terrestre é, de fato, utilizada para síntese de carboidratos, as demais frações são refletidas e emitidas na forma de ondas longas (TAIZ & ZEIGER, 2017).

O aproveitamento da energia é condicionado por fatores físicos e biológicos, estes intrínsecos tanto a morfologia quanto fisiologia da espécie vegetal, como: o tamanho e geometria das plantas; cor, tamanho, arquitetura e idade das folhas; distribuição espacial da vegetação; ângulo de incidência de raios solares e; dos próprios mecanismos de fixação do carbono (PEREIRA et al., 2002).

As plantas C_3 e C_4 possuem diferentes predisposições para uso de radiação solar, água e nutrientes. No que se refere à eficiência de aproveitamento de radiação, plantas C_3 , em condições de altas temperaturas, têm sua atividade reduzida pela fotorrespiração,

ocasionada pela alta atividade oxigenase da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (rubisco), processo metabólico ausente em plantas C₄. Dessa forma, espécies de mecanismo C₄ apresentam um maior aproveitamento desses recursos (KERBAUY, 2012).

Nas áreas de Caatinga do município de Petrolina, pela distribuição de famílias botânicas já registradas por diversos trabalhos (DRUMOND et al. 2002; FABRICANTE et al. 2012; CALISTO JÚNIOR & DRUMOND, 2014), há plantas de mecanismos C₃, C₄ e CAM (SOCORRO & CRISTOBAL, 2013; SAGE, 2016). Plantas de mecanismo CAM (Metabolismo Ácido das Crassuláceas) possuem uma dinâmica no seu ciclo fotossintético, as quais o alteram de C₃ durante o dia para C₄ durante a noite e, têm elevado potencial de uso da água e tolerância a ambientes áridos (KERBAUY, 2012).

A quantificação da PAR pode ser realizada a partir de piranômetros equipados com filtros que separam as outras bandas de radiação, sensores específicos denominados quânticos (PEREIRA et al., 2002), ceptômetros (NOVAIS et al., 2018), de equações empíricas dependentes da radiação global e de produtos obtidos de imagens de satélites (PEREIRA et al., 2002; GITELSON, 2019) e através de técnicas de sensoriamento remoto para determinação direta (TAO et al., 2016).

Os modelos empíricos para estimativa da PAR a partir de variáveis de fácil obtenção são amplamente utilizados pelo fato de que estações meteorológicas, majoritariamente, não contém sensores responsáveis por quantificar essa faixa de radiação. Equações que considerem características peculiares da Caatinga, tanto climáticas quanto de vegetação, são escassas, sobretudo no Vale do Submédio São Francisco (SOBRINHO et al., 2011; NUNES et al., 2012). Assim, evidencia-se a necessidade de se obter modelos desta natureza na região.

Nesse sentido a quantificação da PAR é imprescindível em estudos que busquem verificar a dinâmica entre atmosfera e vegetação, uma vez que esses dados subsidiam modelos que estimam acúmulo de biomassa, processos radiativos em coberturas vegetadas, atividade fotossintética, dentre outros (GITELSON et al., 2015; XIAO et al., 2015; KANNAUJIYA & SINHA, 2017)

Estudos nesse cunho são escassos em áreas do Bioma Caatinga, dentre esses pode-se citar os desenvolvidos por Oliveira et al. (2006), Teixeira et al. (2008), os quais quantificaram fluxos de componentes do balanço de energia e, Souza et al. (2015) que determinaram o balanço de radiação, encontrando frações médias de PAR interceptada e absorvida de 0,69 e 0,64, respectivamente.

3.2. Bioma Caatinga

A Caatinga é um dos biomas encontrados no território brasileiro e é típica de região semiárida, ou seja, que apresentam alta temperatura do ar, baixa umidade relativa do ar e elevada evapotranspiração. Oficialmente, a Caatinga é classificada como Savana Estépica (VELOSO et al., 1991), e é internacionalmente considerada como parte das Florestas Tropicais Sazonalmente Secas - STDF (OLIVEIRA FILHO et al., 2006; PENNINGTON et al., 2000; PRADO, 2000).

Esse bioma possui uma área aproximada de 844.453 km², constituindo cerca de 11% do território nacional, o qual compreende os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais (MMA, 2019) (Figura 2).

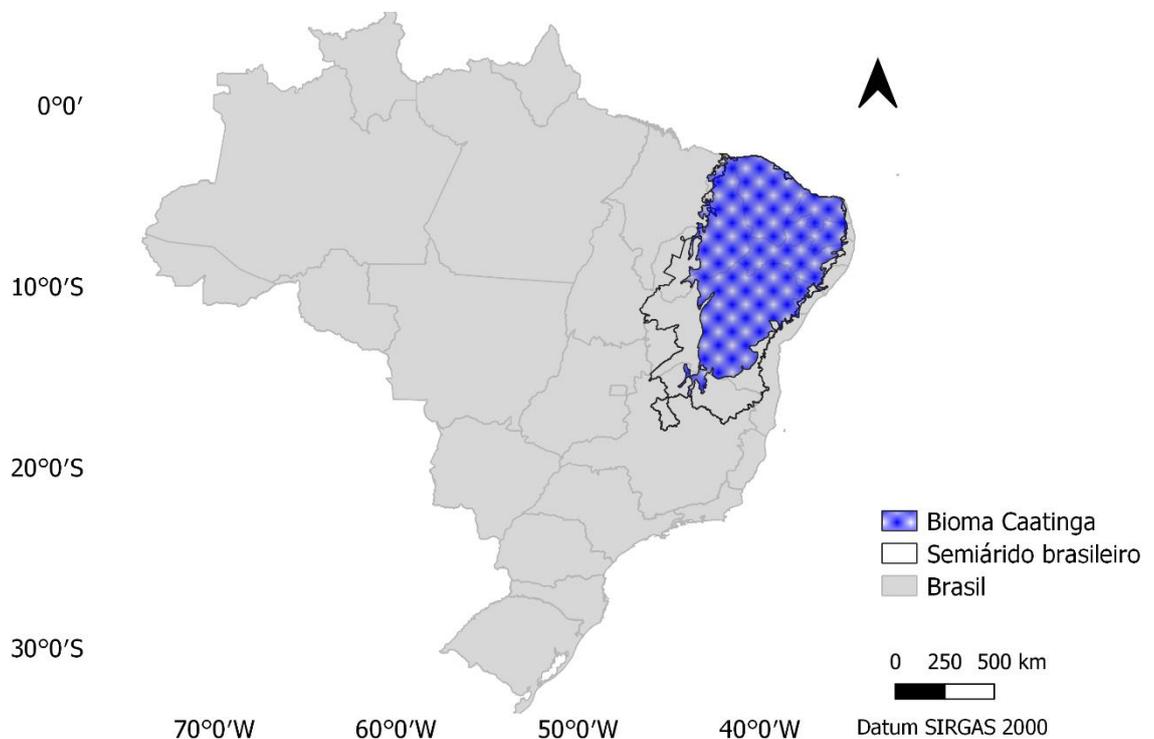


Figura 2. Localização do bioma Caatinga no Brasil e sua dimensão em relação ao semiárido brasileiro. Fonte: Fernandes (2020).

Por possuir um clima semiárido, cerca de 54% da região Nordeste do Brasil tem vegetação típica da Caatinga (HOLANDA et al., 2015). Essa vegetação, majoritariamente, configura-se como florestas arbóreas e arbustivas de pequeno porte (altura média de 5 metros), ramificadas e espinhosas, com comportamento caducifólio ou

xerofítico, abrangendo 5.344 espécies registradas das quais 318 são endêmicas (LOIOLA et al., 2012; BATISTA & SANTOS, 2013).

A composição florística desse bioma é rica em cactáceas, bromeliáceas, euforbiáceas e leguminosas, porém é pobre em gramíneas. Além disso, abriga uma alta biodiversidade animal contendo 178 espécies de mamíferos, 591 de aves, 177 de reptéis, 79 de anfíbios, 241 de peixes e 221 de abelhas (MMA, 2019).

Em épocas secas, a maior parte da vegetação da Caatinga perde suas folhas (comportamento caducifólio) em resposta à escassez de água, resultando em uma paisagem com troncos secos e esbranquiçados, de onde originou a denominação “Caatinga” que significa “mata-branca” no tupi-guarani (LOIOLA et al., 2012). Um dos fenômenos mais conhecidos da Caatinga é sua exuberante recuperação da queda foliar ocasionada pela estiagem no período das chuvas.

Leguminosae, Myrtaceae, Euphorbiaceae, Rubiaceae, Malvaceae, Rutaceae, Cactaceae, Asteraceae, Erythroxylaceae e Moraceae são as famílias que apresentam maior riqueza de espécies na Caatinga, compondo sua diversidade florística. Quanto aos gêneros, tem-se *Eugenia*, *Erythroxylum*, *Senna*, *Ficus*, *Myrcia*, *Mimosa*, *Bauhinia*, *Casearia* e *Aspidosperma*, entre os que apresentam maior riqueza de espécies. E as espécies encontradas com maior frequência são *Aspidosperma pyrifolium* Mart., *Myracrodruon urundeuva* Allemão, *Cereus jamacaru* DC., *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* (Griseb.) Altschul, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Jatropha molíssima* (Pohl) Baill., *Cynophalla hastata* (Jacq.) J. Presl, *Commiphora leptophloeos* (Moric.) J. S. Mill. e *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (BANDA et al., 2016).

Na área de Caatinga nativa do município de Petrolina – PE, Drumond et al. (2002) encontraram 21 espécies, pertencentes a 21 gêneros e 10 famílias botânicas das quais destacaram-se por ser mais frequentes Fabaceae (50,63%) e Euphorbiaceae (28,90%). De acordo com os resultados dos mesmos autores, a maior porção das espécies identificadas são lenhosas, sendo *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., *Caesalpinia mycrophylla* Mart. ex G. Don (A) e *Cnidosculus phyllacanthus* Pax & Hoffm as mais abundantes.

Mais recentemente Fabricante et al. (2012), na região do Submédio do São Francisco, identificaram e classificaram 38 espécies, cujo maior número de indivíduos pertencem às famílias Fabaceae, Euphorbiaceae e Cactacea. Semelhantemente, Calisto Júnior e Drumond (2014) obtiveram Fabaceae e Euphorbiaceae como famílias mais representativas para a mesma região.

Os padrões da fitofisionomia e morfologia da vegetação depende das condições edafoclimáticas locais, podendo apresentar-se com um porte arbóreo e denso, até um subarbustivo aberto, caracterizando três estratos vegetais: arbóreo, arbustivo e herbáceo. Um dos métodos mais práticos utilizados atualmente para identificação e classificação desses padrões da Caatinga foi proposto por Chaves et al. (2008) e utiliza o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL) em imagens de satélites. O qual, segundo os autores, quando associado às técnicas de sensoriamento remoto, pode contribuir como método de referência de controle terrestre, facilitando estudos de monitoramento e gerenciamento ambiental.

Esta metodologia vem sendo empregada em trabalhos que envolvem o Bioma Caatinga como o de Francisco et al. (2014) que identificaram áreas degradadas no Nordeste do Brasil, através da utilização de mapas de IBVL e NDVI; e de Jesus et al. (2019) que realizaram a fragmentação da vegetação visando o monitoramento da cobertura vegetal e identificação de desmatamento.

A classificação por esta técnica da vegetação da Caatinga surge como uma aliada em trabalhos que visem relacionar essa cobertura vegetal e a interação dessa com a atmosfera, uma vez que a heterogeneidade do bioma proporciona diferentes densidades na distribuição da vegetação e por consequência, apresente diferentes processos radiativos. Algumas classificações da vegetação da Caatinga podem ser observadas na Figura 3.





e)



f)



g)





Figura 3. Classes de vegetação: a) Caatinga arbórea, b) Caatinga arbórea arbustiva, c) Arbórea subarbórea densa, d) Subarbórea arbustiva densa, e) Caatinga arbustiva, f) Arbustiva subarbustiva aberta, g) Arbustiva subarbustiva aberta, h) Subarbustiva arbustiva rala, i) Subarbustiva arbustiva muito rala. Fonte: Adaptado de Francisco (2013) e Bitencurti et al. (2017).

3.3. Balanço de radiação em coberturas vegetais

No decorrer dos séculos, estudos que envolvem a vegetação vêm sendo executados, nos mais diversos enfoques, incluindo estudos taxonômicos, botânicos, fisiológicos, fitossociológicos e outros. Desde a descoberta que as plantas necessitam diretamente da radiação eletromagnética emitida pelo Sol para sua sobrevivência, houve aprofundamento em estudos desta natureza (FRANCISCO, 2013).

Diante de todos os órgãos vegetais, para Moreira e Assunção (1997), a estrutura de maior importância é a folha, pois, esta é responsável pela conversão da energia solar em energia química na produção de carboidratos através de sua interação com a radiação eletromagnética. No período úmido, com a presença da água, ocorre desenvolvimento do mesófilo, a alta produção da fotossíntese pelos cloroplastos e o aumento do dossel.

Ao atingir a superfície terrestre e interagir com a vegetação a radiação solar resulta em três frações: aproximadamente 50% do total da radiação que chega até o planeta são

absorvidas pelos pigmentos contidos na folha e participam na síntese de compostos ricos em energia, altera estruturas moleculares, acelera reações, como a foto-oxidação das xantofilas ou ainda, destrói estruturas de uma molécula; outra parte é refletida pelas folhas, caracterizando o fenômeno denominado reflexão; a terceira parte sofre o processo de transmissão das camadas de folhas que compõem a copa (MOREIRA, 2005).

Ao ser interceptada por um dossel vegetativo, a radiação solar pode ser absorvida (PAR_A), refletida (PAR_R) ou transmitida (PAR_T), além disso, há a porção que é interceptada pelo dossel (PAR_I). Ao ser transmitida, sofre processos abaixo do dossel, com possibilidade de ser refletida pelo solo com direção à atmosfera (PAR_{RS}) ou ainda refletida pelo solo e ser absorvida pela parte inferior da copa (PAR_{RD}) (Figura 4). As frações de PAR correspondentes a cada processo dependem de fatores inerentes as características da espécie vegetal e ao ângulo zenital do Sol, os quais já foram detalhados anteriormente.

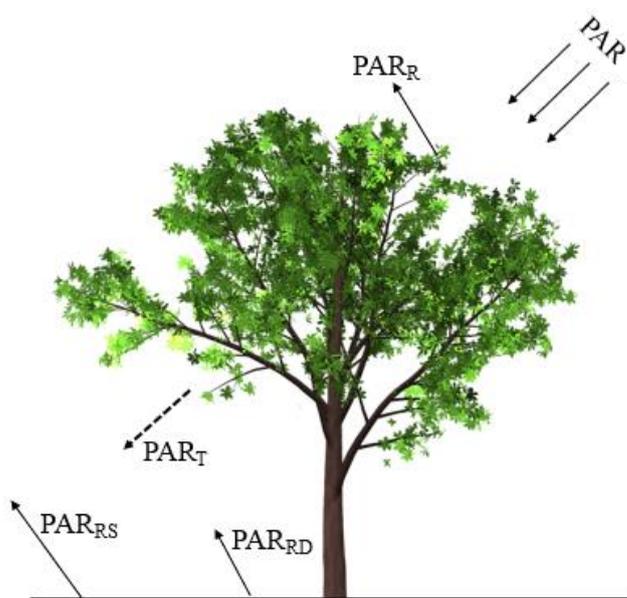


Figura 4. Distribuição da PAR incidente em vegetação. Fonte: Fernandes (2020).

As radiações absorvida e interceptada, a priori, eram consideradas semelhantes, no entanto, Asrar et al. (1989) e Russell et al. (1989) evidenciaram uma distinção sutil entre os dois componentes. A PAR_I não considera a absorção de radiação, tendo em vista que nem todos os fótons interceptados são absorvidos, os quais estão sujeitos a sofrer reflexão ou transmissão.

A quantificação dos componentes do balanço de radiação PAR em dosséis pode ser realizada a partir de sensores, como os utilizados por Parker et al. (2005) e Giri et al.

(2017). Esses autores instalaram sensores quânticos acima e abaixo do dossel de plantas, posicionando-os nas direções para cima e para baixo, identificando assim, as proporções da PAR incidente, refletida (solo e dossel), transmitida e indiretamente, absorvida. Estudos nessa natureza, majoritariamente, visam mensurar a produtividade vegetal (XUE et al., 2015; GITELSON et al., 2015; GIRI et al. 2017; ELOY et al., 2018).

Outra opção para essa quantificação é a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, a qual dispensa a necessidade de sensores radiativos na área avaliada, estimando os componentes do balanço de radiação PAR a partir de dados radiométricos e equações empíricas (ANDRADE et al., 2014). Embora a obtenção dos dados com essa metodologia apresente facilidade, os trabalhos existentes na literatura não mensuram e expõem todas as frações da PAR, dentre os quais, pode-se mencionar Silva et al. (2013), Andrade et al. (2014), Oliveira et al. (2016) que estimam apenas a PAR incidente, interceptada e absorvida.

3.4. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto consiste em um conjunto de técnicas utilizadas para a obtenção de imagens da superfície terrestre à distância através de sensores remotos, estes podem ser acoplados tanto em aeronaves quanto em satélites (STEFFEN, 2019). Esse método teve início com a invenção da câmera fotográfica e obteve seu ápice com o desenvolvimento dos satélites na década de 70 (FIGUEIREDO, 2005).

A identificação do alvo, seja solo, água, vegetação, fenômenos atmosféricos, entre outros, é dada a partir da detecção de diferenças na refletância dos mesmos, isto é, como cada alvo reflete a radiação eletromagnética (BRANDÃO et al., 2008) (Figura 5). A captura realizada pelos sensores pode ser de forma ativa ou passiva. Os sensores ativos possuem uma fonte própria de energia eletromagnética, não dependendo de fontes externas (naturais ou artificiais), como os passivos (DI MAIO et al., 2008).

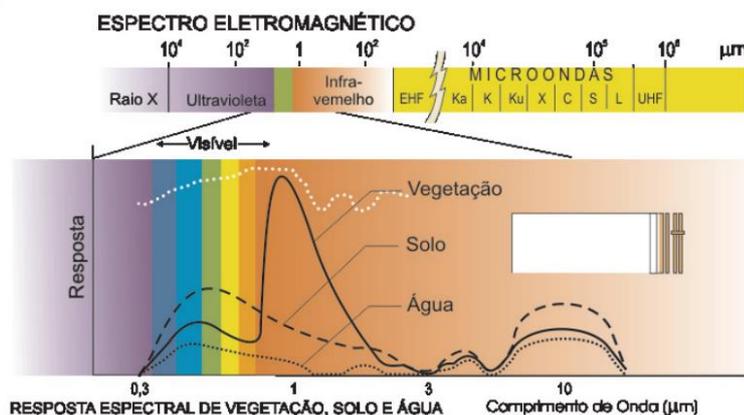


Figura 5. Refletância espectral de alvos naturais. Fonte: Di Maio et al. (2008).

Diversas séries de satélites, com aplicações específicas, orbitam atualmente a Terra, dentre estes pode-se citar o Landsat e Meteosat. Os satélites da primeira série são destinados ao imageamento dos recursos naturais, enquanto os das duas últimas são utilizados para fins meteorológicos (FIGUEIREDO, 2005). O programa Landsat foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), possuindo sensores passivos, sendo o primeiro satélite lançado com a intenção de estudar e monitorar a superfície terrestre (NASA, 2020).

Um dos satélites da série Landsat é o Landsat-5. Este satélite é equipado com o sensor TM (Thematic Mapper). O sensor TM registra dados em sete canais ou bandas espectrais, as quais são três no visível, um no infravermelho próximo, dois no infravermelho médio e um no infravermelho termal, com uma resolução espacial de 30 m, com exceção para o canal termal, que possui resolução de 120 m (USGS, 2019).

A órbita do satélite Landsat-5 é de aproximadamente 98° de inclinação, posicionando-se de forma hélio-síncrona e girando em órbita da Terra a uma altitude de 705 km. Possui resolução temporal de 16 dias e cada imagem cobre uma área de 185 por 185 km² (USGS, 2019).

A série Landsat possui como último lançamento o satélite Landsat-8 no ano de 2013, a uma altitude de aproximadamente 705 km, possuindo os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) (COELHO & CORRÊA, 2013). O sensor OLI possui nove bandas multiespectrais para realizar coleta de dados na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas e uma banda pancromática. O sensor TIRS tem duas bandas de pixel de 100 m as quais são processadas e disponibilizadas em 30 m (NASA, 2020).

O satélite Landsat-8 apresenta órbita praticamente polar, posicionando-se de maneira heliossíncrona. Com exceção para as mais altas latitudes polares, o satélite é capaz de realizar a cobertura de imagens para todo o globo terrestre (COELHO & CORRÊA, 2013). Os sensores acoplados a este satélite possuem faixa de imageamento de 170 km norte-sul por 185 km leste-oeste, apresentando resolução temporal de aproximadamente 16 dias com um campo de visada de aproximadamente 15° e 19°, resolução espacial de 30 m para as bandas do visível, 15 m para banda pancromática (COELHO & CORRÊA, 2013; NASA, 2020). Algumas características dos satélites Landsat-5 e Landsat-8 podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos satélites Landsat-5 e Landsat-8.

	Banda	Resolução espectral (µm)	Resolução espacial (m)	Resolução temporal	Resolução radiométrica
Landsat 5 Sensor TM	1	0,45 – 0,52	30	16 dias	8 bits (256 tons de cinza)
	2	0,52 – 0,60	30		
	3	0,63 – 0,69	30		
	4	0,76 – 0,90	30		
	5	1,55 – 1,75	30		
	6	10,40 – 12,50	120		
	7	2,08 – 2,35	30		
Landsat 8 Sensores OLI/TIRS	2	0,45 – 0,51	30	16 dias	16 bits (65.535 tons de cinza)
	3	0,53 – 0,59	30		
	4	0,64 – 0,67	30		
	5	0,85 – 0,88	30		
	6	1,57 – 1,65	30		
	7	2,11 – 2,29	30		
	10	10,6 – 11,19	100		

Fonte: LINS (2018).

O sensoriamento remoto possui grande relevância no que se refere ao monitoramento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, contribuindo nas previsões de tempo e melhor entendimento de mudanças climáticas (BEZERRA et al., 2013). Além de identificação de áreas que sofrem ou que estão predispostas à desertificação, subsidiando políticas públicas de mitigação dos impactos desses

fenômenos. Diversos estudos dessa natureza vêm sendo desenvolvidos (MARTINS et al., 2018; VERÓN et al., 2018; PASTICK et al., 2019).

As técnicas de sensoriamento remoto se destacam por apresentarem boa precisão e baixo custo para estudos de mudanças da superfície e ainda, estimativas de balanço de radiação e de energia em escala regional (MACHADO et al., 2014).

4. Material e Métodos

4.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo contempla o retângulo envolvente entre 9° 3'S a 9°30'S e 39° 54'W a 40°34'W, contendo uma porção dos municípios de Petrolina e Lagoa Grande pertencente ao estado de Pernambuco; Juazeiro e Curaçá ao estado da Bahia. Esta área faz parte do perímetro irrigado Senador Nilo Coelho, conhecida como Vale do Submédio São Francisco (Figura 6).

A cobertura do solo na região é predominantemente composta por formações florestais de mata nativa, pastagens e áreas agrícolas (Figura 6).

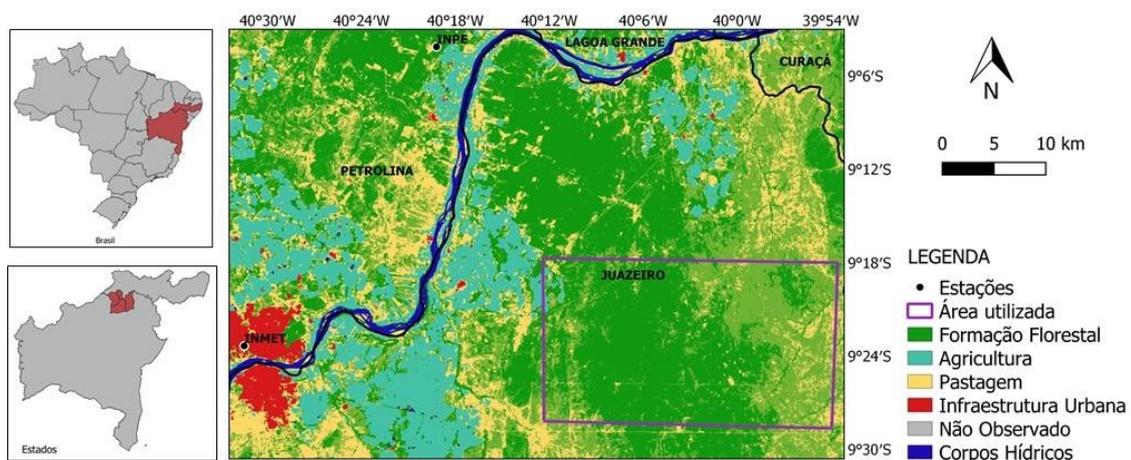


Figura 6. Mapa de cobertura da vegetação e do uso do solo na área de estudo, região do Vale do Submédio São Francisco. Fonte: MapBiomas, Coleção 5 (2019). *Área em roxo foi utilizada para determinação da distribuição da PAR especificamente em áreas de mata nativa.

A Região integra o semiárido nordestino com clima BSw^h, segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), sendo caracterizada como quente e seca, com precipitação média de 571,5 mm ano⁻¹, temperatura média anual de 26,4°C, com média mínima de 20,6°C, máxima de 31,7°C (LOPES et al., 2018) e insolação de 3.000 horas ano⁻¹ (ORTEGA & SOBEL, 2010). Mesmo com reduzidos totais pluviométricos, a disponibilidade hídrica da região não é afetada, pois há oferta de água oriunda do rio São Francisco, a qual permite o desenvolvimento da fruticultura local através da irrigação.

A vegetação natural predominante é a Caatinga Hiperxerófila, típica de ambiente quente e seco, adaptada bem a solos pedregosos, com *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., *Caesalpinia mycrophylla* Mart. ex G.Don (A) e *Cnisdosculus phyllanthus* Pax &

Hoffm como espécies predominantes e Fabaceae e Euphorbiaceae como famílias mais representativas (CALISTO JÚNIOR & DRUMOND, 2014).

A região possui relevo suave-ondulado (Figura 7), mas contendo elevações residuais, cristais e/ou outeiros pontuais que são os testemunhos dos ciclos de erosão que houve em épocas passadas nessa região (CASTRO & SANTOS, 2015). Os solos são profundos e desenvolvidos, destacando-se Argissolos Vermelho-Amarelos e Amarelos (SILVA et al., 2005).

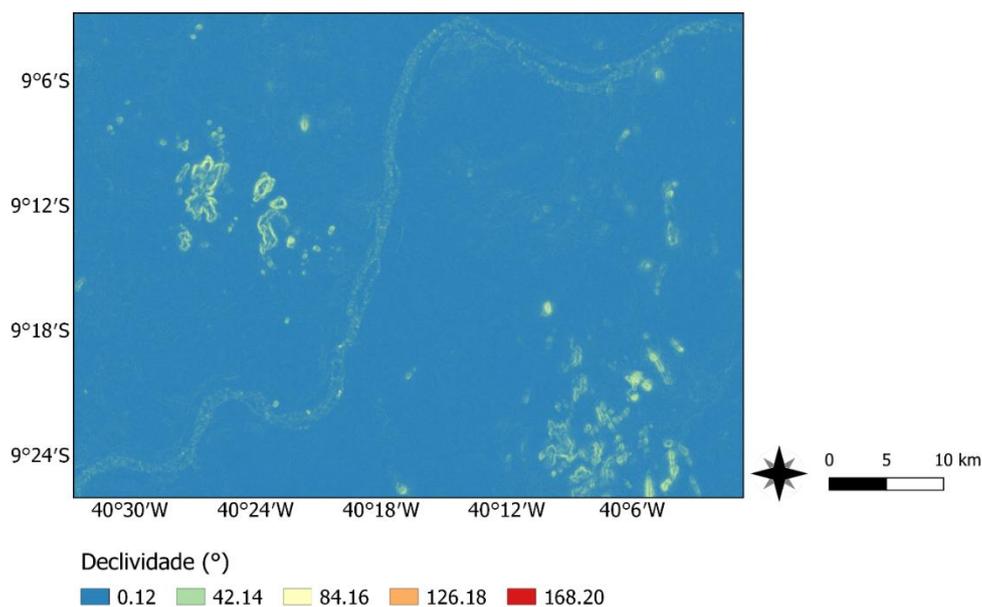


Figura 7. Declividade do terreno no Vale do Submédio São Francisco derivada do Modelo digital de elevação do sensor ASTER/Terra com resolução espacial de 30m. Fonte: Fernandes, 2020.

4.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizada nas coordenadas geográficas: 09° 04' 08" S; 40° 19' 11" O e 387 m, no município de Petrolina – PE, na área pertencente à Embrapa Semiárido.

As variáveis correspondem aos elementos meteorológicos radiação solar global (Rg; Wm^{-2}); radiação fotossinteticamente ativa (PAR; Wm^{-2}); temperatura do ar (Ta; °C); umidade relativa do ar (UR; %); pressão atmosférica (P; hPa); precipitação pluvial (Chuva; mm) e; velocidade (Ws; $m s^{-1}$) e direção (Wd; graus) do vento (Tabela 2).

Tabela 2. Dados meteorológicos disponíveis referentes às datas das imagens do Landsat-5 e Landsat-8. DJ = Dia Juliano; UTC = Unidade de Tempo Central.

Data	DJ	Hora UTC (h:min)	T _a (°C)	UR (%)	P (hPa)	R _g (W/m ²)	W _s (m/s)	PAR (W/m ²)	W _d (Graus)	Chuva (mm)
04/06/09	155	12:36	27,74	55,15	974,49	672,5	4,381	341,3	123,8	0
10/06/11	161	12:37	26,00	59,89	974,68	667,6	2,576	328,7	152,4	0
30/05/13	150	12:50	28,46	54,15	972,08	713,0	4,218	361,1	123,5	0
10/06/17	161	12:47	27,08	60,79	973,71	767,0	3,08	331,9	82,9	0

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos na estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada nas coordenadas 09° 23' 18" S; 40° 31' 23" O e 372,54 m, no mesmo Município. Foram obtidos dados mensais dos meses correspondentes e anterior às datas de obtenção das imagens para os anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

4.3. Dados orbitais

As imagens são provenientes do sensor TM do Landsat 5, para os anos de 2009 e 2011 e, dos sensores OLI e TIRS os quais estão a bordo do Landsat 8, nos anos de 2013, 2016, 2017 e 2019 (Tabela 3). Além disso, utilizou-se o Global Digital Elevation Model Versão 3 (GDEM V003) adquirido pelo sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), ambos com resolução espacial de 30m (NASA, 2020), utilizado para obtenção da declividade e da transmitância atmosférica.

As imagens Landsat 5 e 8 (Tabela 3) e ASTER GDEM V003 foram obtidas no *United States Geological Survey* (USGS, 2019) para o município de Petrolina – PE, que corresponde a cena de órbita 217 e ponto 66. Para seleção das imagens foi considerando a ausência ou pouca cobertura de nuvens (menor que 10%) e, tendo em vista a finalidade de se observar a cobertura vegetal, oriundas do final do período chuvoso da região, o qual segundo a normal climatológica, se configura entre os meses de abril e maio (INMET, 2019).

Tabela 3. Imagens obtidas nos satélites Landsat 5 e 8. Horário da passagem do Landsat em hora (h) e min (minuto) da Unidade de Tempo Central (UTC). Fonte: USGS (2019)

Satélite	Datas	Horário (h:min)	Ângulo zenital (z)	Distância relativa Terra – Sol	Ângulo azimutal (a)
Landsat 5	04/06/2009	12:36	43,33°	1,0145298	43,49°
	10/06/2011	12:37	43,65°	1,0152310	42,86°
Landsat 8	30/05/2013	12:50	40,44°	1,0137619	40,62°
	22/05/2016	12:47	39,76°	1,0124103	42,44°
	10/06/2017	12:47	41,99°	1,0152535	40,41°
	29/04/2019	12:47	35,89°	1,0070272	50,06°

4.4. Etapas de processamento

Após o recorte da área de estudo, realizou-se a calibração radiométrica das bandas espectrais, convertendo o número digital de cada pixel e banda em radiância espectral. O recorte, a mudança de datum/projeção e processamento das imagens foram feitos no software QGIS 3.6.2 (QGIS *Development Team*, 2019). A seguir tem-se a descrição de cada variável calculada no processamento.

4.4.1. Refletância Monocromática

Para obter a refletância é necessário realizar a conversão dos valores quantizados e calibrados do nível de cinza de cada banda utilizando os fatores aditivos e multiplicativos referentes à refletância monocromática, disponibilizados nos metadados das imagens. A qual, é determinada conforme a equação (USGS, 2019):

$$r_b = \frac{(Add_{ref,b} + Mult_{ref,b} \cdot ND_b)}{\text{Cos } Z \cdot dr} \quad (1)$$

em que: r_b é a refletância monocromática de cada pixel e de cada banda ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$); $Add_{ref,b}$ é o termo aditivo; $Mult_{ref,b}$ é o termo multiplicativo; e ND_b é a intensidade de cada pixel; dr e $\text{Cos } Z$ são obtidos conforme as equações 2 e 3 proposta por Duffie e Beckman (1980), respectivamente.

$$dr = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{DSA \cdot 2 \cdot \pi}{365}\right) \quad (2)$$

em que: DSA é o dia sequencial do ano e a função \cos está em radianos, dr é o inverso do quadrado da distância Terra-Sol.

O cosseno do ângulo zenital (Z) é obtido a partir do ângulo de elevação solar (E) em graus, disponibilizado no metadados, de acordo com a Equação 3.

$$\cos Z = \cos \left(\frac{\pi}{2} - E \right) = \text{SEN} (E) \quad (3)$$

Para a etapa seguinte, é necessário quantificar os pesos de cada banda espectral (P_b , adimensional), de acordo com a metodologia de Chander e Markham (2003). Assim, a priori, estima-se a constante solar ($W \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) associada a cada uma das bandas refletivas, utilizando a equação 4:

$$k_b = \frac{L_b \cdot \pi}{r_b \cdot \cos Z \cdot dr} \quad (4)$$

Em que: o k_b é a constante solar ($W \text{ m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) associada a cada uma das bandas refletivas no topo da atmosfera.

Posteriormente, calcula-se os pesos (P_b) para cada banda, sendo esses determinados pela razão entre o k_b da banda em questão e o somatório de todos os k_b das bandas, como expresso na Equação 5.

$$P_b = \frac{K_b}{\sum K_b} \quad (5)$$

4.4.2. Albedo planetário

Essa variável está relacionada à quantidade de radiação refletida por cada pixel sem correção atmosférica, sendo determinado através de uma combinação linear das refletâncias espectrais em cada uma das bandas e seus respectivos pesos (P_b), conforme a Equação 6.

$$\alpha_{toa} = p_2 \cdot r_2 + p_3 \cdot r_3 + p_4 \cdot r_4 + p_5 \cdot r_5 + p_6 \cdot r_6 + p_7 \cdot r_7 \quad (6)$$

Em que: α_{toa} é o albedo planetário de cada pixel ou albedo sem correção atmosférica; p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , p_6 e p_7 representam os pesos de cada uma das bandas, respectivamente e r_2 , r_3 , r_4 , r_5 , r_6 e r_7 são as refletâncias de cada uma das bandas utilizadas, respectivamente.

4.4.3. Albedo da superfície

Em decorrência da interferência atmosférica na radiação solar, principalmente pelos processos de absorção e espalhamento, é essencial realizar uma correção no albedo planetário, que pode ser feita mediante a seguinte equação Allen et al. (2002)

$$\alpha_{\text{sup}} = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{atm}}}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (7)$$

em que: α_{sup} é o albedo da superfície corrigido; α_{atm} consiste na refletância da própria atmosfera, sendo recomendado o valor de 0,03 (BASTIAANSSEN, 2000) e τ_{sw} é a transmissividade da atmosfera que nas condições de céu claro calcula-se utilizando a Equação 8 (ALLEN et al., 2002).

$$\tau_{\text{sw}} = 0,75 + 2 * 10^{-5} * \text{SRTM} \quad (8)$$

em que: SRTM consiste no modelo de elevação digital da região (ASTER GDEM V003).

4.4.4. Índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) é utilizado como indicador de vegetação verde, cujos valores variam de -1 a +1. Sua obtenção foi proveniente da razão entre a diferença das refletâncias do infravermelho próximo e do vermelho e pela soma das mesmas, como expresso na Equação 9 (ROUSE et al., 1973).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{IV}} - \rho_{\text{V}}}{\rho_{\text{IV}} + \rho_{\text{V}}} \quad (9)$$

em que: ρ_{IV} é a banda do infravermelho próximo; e ρ_{V} a do vermelho.

Ao considerar os efeitos do solo sob a vegetação, têm-se o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI), desenvolvido por Huete (1988), é atribuída uma constante “L” (fator de ajuste), de acordo com a equação 10. Essa pode assumir valores variando entre 0,25 e 1, dependendo do tipo de vegetação estudada, sendo 0,5 para vegetação com densidade intermediária, e 1 para vegetação com baixa densidade. Geralmente, utiliza-se $L = 0,5$ (ALLEN et al., 2002), no entanto, estudos mais recentes vêm utilizando o valor de L igual a 0,1, o qual foi utilizado (SOUZA, 2014).

$$SAVI = \frac{(1 + L) \cdot (\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (10)$$

em que: L é o fator de ajuste ao solo, ρ_{IV} refletância da banda do infravermelho próximo e ρ_V a da banda do vermelho.

O Índice de Área Foliar (IAF) é um índice biofísico definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área de terreno utilizada por esta vegetação ($m^2 m^{-2}$), consiste em um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, estimado pela seguinte equação (ALLEN et al., 2002):

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (11)$$

4.4.5. Radiação de onda curta incidente

O fluxo de radiação solar de onda curta incidente ou radiação global (R_g) consiste nos fluxos de radiação direta e difusa que atinge a superfície terrestre. Essa variável foi calculada através da seguinte equação (ALLEN et al., 2002):

$$R_g = S \cdot \cos Z \cdot dr \cdot \tau_{sw} \quad (12)$$

em que: S é a constante solar (1367 Wm^{-2}); Z é o ângulo zenital do Sol; dr é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, obtida conforme Equação 8.

4.5. Balanço de Radiação fotossinteticamente ativa

A parcela de radiação referente a fotossinteticamente ativa (PAR) foi estimada a partir da radiação de ondas curtas incidente (R_g), com o emprego da Equação 13 (TSUBO & WALKER, 2005).

$$PAR = (0,12 kt^2 - 0,334 \times kt + 0,613) \times R_g \quad (13)$$

em que: PAR é a radiação fotossinteticamente ativa (Wm^{-2}) e k_t é o índice de claridade (razão entre a radiação global e a radiação solar extraterrestre).

Os componentes do balanço de radiação PAR na vegetação foram quantificados individualmente, conforme expresso a seguir.

4.5.1. PAR refletida (solo + vegetação)

Este componente refere-se à porção da PAR refletida pela superfície, isto é, considerando uma área com ausência de corpos hídricos, essa parcela da PAR seria definida pela refletância da vegetação e do solo. Assim, quantificou-se esta variável com a seguinte equação:

$$PAR_R = PAR \cdot \alpha_{sup} \quad (14)$$

em que: PAR_R é a parcela da radiação fotossinteticamente ativa refletida pela superfície (solo + vegetação) em Wm^{-2} ; α_{sup} é o albedo da superfície (adimensional).

4.5.2. PAR interceptada

A radiação fotossinteticamente ativa interceptada caracteriza-se como a porção da PAR incidente que é interceptada pelo dossel da vegetação. Essa variável foi determinada por meio da expressão empírica sugerida por Daughtry et al. (1992) (Equação 15). Essa metodologia vem sendo utilizada por diversos estudos (BASTIAANSEN & ALI, 2003; DANELICHEN et al., 2015; SILVA et al., 2018) inclusive em áreas de Caatinga (SILVA et al., 2013).

$$PAR_I = - 0,161 + 1,257 \cdot NDVI \quad (15)$$

em que: PAR_I é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (Wm^{-2}); NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada.

4.5.3. PAR absorvida

Uma vez estimadas a PAR e PAR_I , pode-se então determinar, em Wm^{-2} , a fração absorvida (PAR_A) empregando-se a equação (SOUZA et al., 2015):

$$PAR_A = PAR_I \cdot 0,9368 \quad (16)$$

4.5.4. PAR transmitida

Considerando que a PAR incidente pode sofrer processos de absorção, reflexão e transmissão, tem-se que a parcela de PAR transmitida pode ser obtida a partir da seguinte equação (DAUGHTRY et al.,1992):

$$PAR_T = PAR - PAR_I - PAR_R \quad (17)$$

em que: PAR_T é a radiação fotossinteticamente ativa transmitida (Wm^{-2}).

4.5.5. PAR refletida pelo solo e absorvida pela vegetação

Esta componente corresponde à fração da PAR_T que atinge o solo, sendo assim refletida pelo mesmo e que pode ser absorvida pela superfície inferior do dossel. A sua determinação foi realizada com a Equação 18, de acordo com (DAUGHTRY et al.,1992).

$$PAR_{RA} = PAR - PAR_A - PAR_T - PAR_R \quad (18)$$

em que: PAR_{RA} é a radiação fotossinteticamente ativa refletida pelo solo e absorvida pelo dossel (Wm^{-2}).

4.6. Regressão polinomial

Os dados dos componentes da PAR obtidos da área de vegetação nativa (área destacada em roxo na Figura 6, foram relacionados com o IAF para encontrar padrões de distribuição espacial e testar qual o melhor modelo de ajuste, vale ressaltar que os dados foram extraídos das imagens em 735 pontos distribuídos pelo software QGIS 3.6.2 (QGIS *Development Team*, 2019).

Além disso, foram determinados os coeficientes de determinação (R^2), de correlação de Pearson (r), verificado a significância dos coeficientes com o teste t-student ao nível de confiança de 95 ou 99% utilizando o Software R versão 3.6.1 (R CORE TEAM, 2019). O coeficiente de correlação foi classificado de acordo com Devore (2006) conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Coeficiente de correlação de Pearson. **Fonte:** Adaptado de Devore (2006)

R	Definição
0.00 a 0.19	Correlação Bem Fraca (CBF)
0.20 a 0.39	Correlação Fraca (Cf)
0.40 a 0.69	Correlação Moderada (CM)
0.70 a 0.89	Correlação Forte (CF)
0.90 a 1.00	Correlação Muito Forte (CMF)

4.7. Classificação da vegetação

Tendo em vista as diferentes interações radiativas entre a vegetação e a atmosfera de acordo com o tipo de vegetação, como já enfatizado anteriormente, a cobertura vegetal foi classificada nas classes do Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL) segundo o NDVI (Tabela 5).

Tabela 5. Classificação da vegetação segundo o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa e o NDVI. **Fonte:** Francisco et al. (2014).

Classes de IBVL	NDVI
11 - Arbórea muito densa	>0,350
10 - Arbórea densa	0,32 a 0,35
9 - Subarbórea densa	0,30 a 0,32
8 - Subarbórea Arbustiva densa	0,285 a 0,30
7 - Arbustiva Subarbórea densa	0,265 a 0,285
6 - Arbustiva Subarbórea aberta	0,25 a 0,265
5 - Arbustiva Subarbustiva aberta	0,225 a 0,25
4 - Subarbustiva Arbustiva rala	0,20 a 0,225
3 - Subarbustiva Arbustiva muito rala	0,15 a 0,20
2 - Solo exposto	0,0 a 0,15
1 - Corpos d'água	-1 a 0,0

Com a identificação das classes da vegetação, foi possível quantificar os componentes do balanço de radiação fotossinteticamente ativa em cada tipo de classe, observando o comportamento desses em relação à variação da densidade vegetal. Esta quantificação foi realizada após desconsiderar as áreas de formações não florestais (pastagem, agricultura, corpos hídricos e áreas urbanas) visando a não interferência desses nos componentes radiativos.

Na Figura 6 pode-se observar a área de vegetação exclusivamente natural da Caatinga (em roxo) que foi utilizada para identificação da distribuição da radiação fotossinteticamente ativa nas diferentes classes do IBVL (Tabela 5).

A mesma metodologia foi empregada para a identificação da distribuição da radiação fotossinteticamente ativa nas classes de uso e cobertura do solo caracterizadas pelo projeto MapBiomass, conforme já mencionado na Figura 6.

5. Resultados e Discussão

5.1. Cobertura vegetal

Por compreender uma área do Bioma Caatinga, a cobertura vegetal da região possui uma evidente variação anual nos índices de vegetação. Em relação ao NDVI (Figura 8), observa-se que no ano de 2009, houve um predomínio de vegetação com maior NDVI (acima de 0,391) em áreas de vegetação natural e agropecuárias.

Nos anos de 2011, 2013 e 2017, nota-se que há uma diminuição deste índice, ocasionando a manifestação de uma vegetação mais rala e presença de áreas de solo exposto (cor amarela). Em 2016 e 2019 é possível verificar um predomínio de vegetação mais densa, com NDVI variando de 0,391 a 0,854. Vale salientar que as áreas de produção agrícola têm seus valores de NDVI inalterados em relação ao tempo, pois estas regiões estão constantemente sob sistema de irrigação, impedito assim, a ação de fatores ambientais na sua densidade.

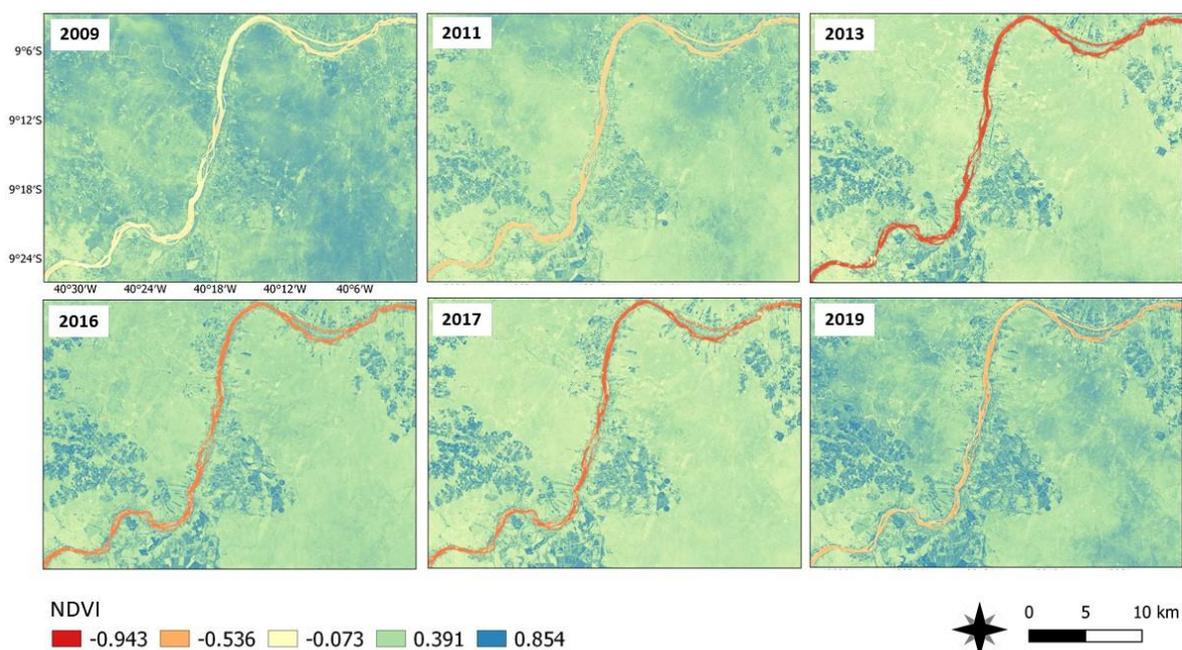


Figura 8. Distribuição espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

A variação do NDVI está relacionada, principalmente, à variação dos totais pluviométricos na região e, segundo Liu et al. (1991) a maior correlação entre essas variáveis ocorre quando se compara o NDVI com a precipitação do mês anterior. Assim, anos em que há ocorrência de mais precipitações e maior acúmulo de chuva no mês

anterior, como 2009 e 2019 (Figura 9), tendem a apresentar vegetação com maiores valores desse índice. Em contrapartida, anos que obtiveram menores valores médios de NDVI, como 2011, 2013 e 2017, estão relacionados ao menor número de precipitações e menor acúmulo de chuva no mês anterior à passagem do satélite (Figura 9).

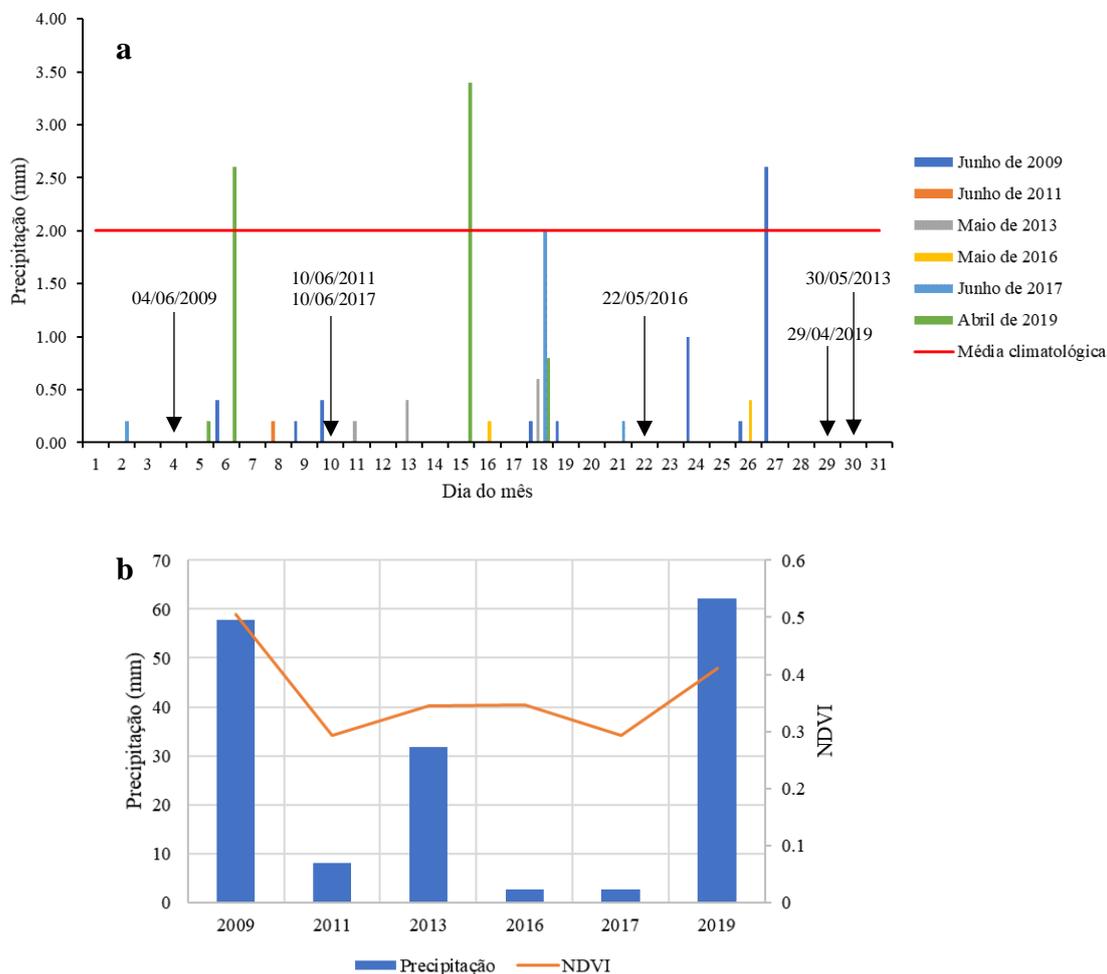


Figura 9. Precipitação diária mensal (a) e acumulada no mês anterior à data de passagem do satélite (b) no município de Petrolina, Pernambuco.

Em junho de 2009, houve um maior número de precipitações em relação às demais, sendo uma delas acima da média climatológica (Figura 9), no entanto, nota-se que a data da passagem do satélite é no início do mês, assim os maiores valores do NDVI são condicionados, principalmente, pela precipitação do mês anterior (57,8 mm). Nos demais anos, houve registro de precipitação abaixo da média, com exceção do mês de abril de 2019, que obteve dois registros acima da média climatológica de 2 mm. O mês de abril de 2019 é o que apresentou os maiores totais pluviométricos com o acúmulo de

7 mm de chuva, sendo o dia 15 o mais chuvoso. Junho de 2009 obteve acúmulo de 5,2 mm, enquanto os demais anos obtiveram acúmulos inferiores a 3 mm de chuva.

Os meses de maio a outubro constituem o período seco da região, o que justifica os baixos totais pluviométricos observados em abril, em contrapartida integra o final do período chuvoso que fundamenta o maior acúmulo de precipitação nesse mês. De acordo com Silva et al. (2017), nessa região, a maior parte da precipitação anual se concentra no primeiro e quarto trimestre, com 57 e 24%, respectivamente. No segundo (época avaliada neste estudo) e terceiro trimestres, o percentual é mais baixo, com 16 e 3%, respectivamente.

No que se refere ao SAVI, tem-se um padrão de variação do índice semelhante à variação do NDVI (Figura 10), com valores superiores no ano de 2009, variando de 0,454 a 0,689 na maior porção da área. Em 2011, 2013, 2016 e 2017, há uma distribuição similar do SAVI, o qual tem valores predominantes de 0,219 e 0,454 na região. Um aumento do SAVI nas áreas de formação florestal, campos e pastagem é observada em 2019, com valores em torno de 0,454.

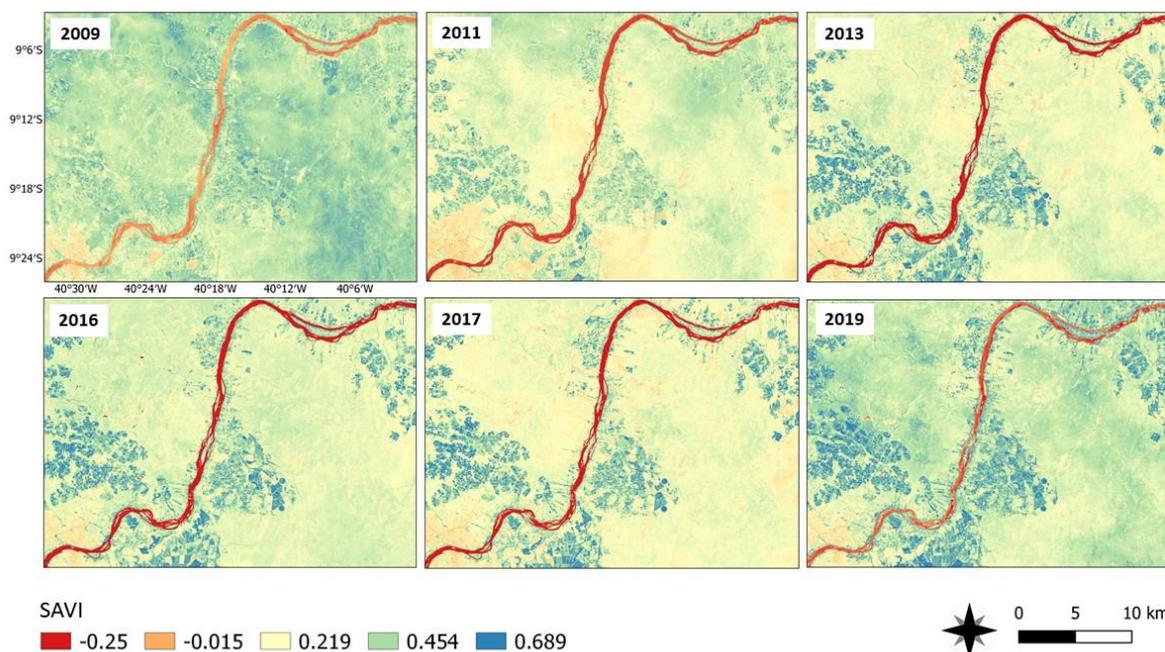
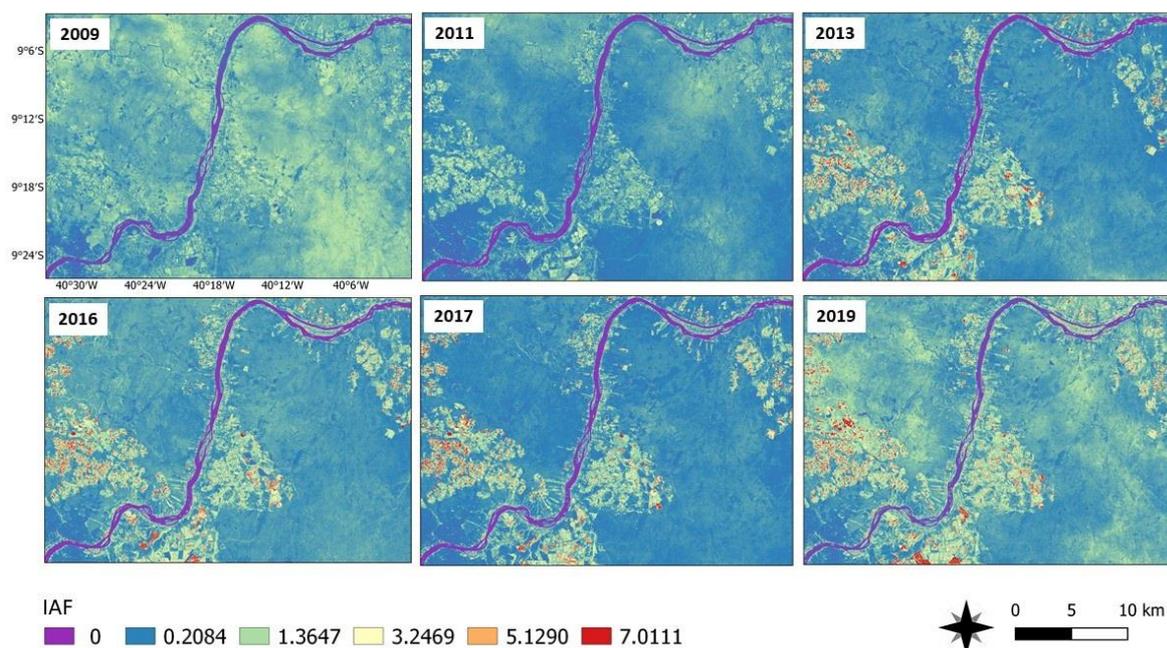


Figura 10. Distribuição espacial do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

Assim como no NDVI (Figura 8) as áreas associadas à agricultura têm seus valores inalterados no decorrer do ano, estando situados em torno de 0,689. Além disso, é possível notar nos mapas (Figura 10) a presença de corpos hídricos e áreas urbanas (valores negativos) (FERREIRA et al., 2012).

Como os demais índices de vegetação já mencionados, o Índice de Área Foliar (IAF) também está relacionado à disponibilidade hídrica. Dessa forma, os anos de 2009 e 2019 manifestaram evidentemente um maior IAF, por disporem de mais cobertura



vegetal e, conseqüentemente, de maior densidade de vegetação (Figura 11). Nesses anos, há predominância de valores situados entre $1,3647\text{m}^2/\text{m}^2$ nas áreas de formação florestal e de IAF variando de $1,3647$ a $7,0111\text{m}^2/\text{m}^2$ nas áreas agrícolas.

Figura 11. Distribuição espacial do Índice de Área Foliar (IAF) no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

Em 2011, 2013, 2016 e 2017, percebe-se que o IAF se localiza, majoritariamente, em torno de $0,2084\text{m}^2/\text{m}^2$, caracterizando baixos índices com relação aos demais anos, indicando a presença de uma vegetação mais rala, com exceção das áreas voltadas à agricultura.

A variação da densidade da vegetação pode ser visualizada de uma forma mais nítida na Figura 12, em que através do NDVI, obteve-se a classificação da cobertura vegetal de acordo com o Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa (IBVL). Seguindo o mesmo padrão dos índices já discutidos, os anos de 2009 e 2019 apresentam maior densidade vegetal exibindo as classes arbórea densa e muito densa na maior parte da extensão territorial analisada, o que esclarece os maiores valores de NDVI, SAVI e IAF para esses anos.

Nota-se que nos anos de 2011, 2013, 2016 e 2017, há uma caracterização de uma vegetação mais heterogênea, revelando uma distribuição mais diversa da cobertura vegetal na região, em que há existência de vegetação subarbustiva arbustiva muito rala a arbórea muito densa.

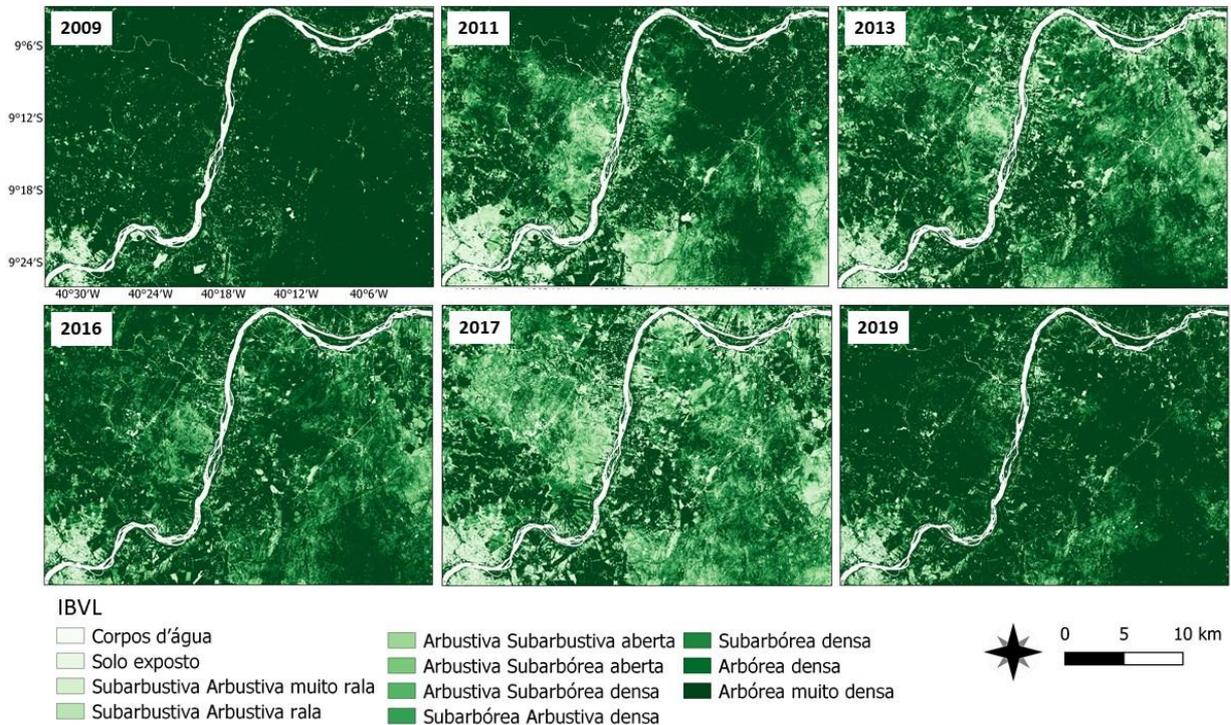


Figura 12. Classificação da vegetação no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

Áreas de formação não florestal (agricultura e pastagens) estão incluídas na classificação, apesar de não representarem vegetação nativa da Caatinga, a fim de se ter uma visão mais ampla da distribuição vegetal da região.

5.2. Balanço de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR)

A dinâmica espaço-temporal da PAR na região do Vale do São Francisco segue o mesmo padrão no decorrer dos anos (Figura 13) com valores variando de aproximadamente 311 a 357 Wm^{-2} . Como a declividade influencia diretamente na radiação que atinge a superfície (VIANELLO & ALVES, 2012) observa-se que, em todas as situações, regiões com menores declividades apresentaram menores valores de PAR incidente à superfície, enquanto localidades de maiores altitudes dispuseram de maiores valores de radiação. Estudos realizado por Lopes et al. (2013), na serra da Mantiqueira,

sudeste do Brasil, observaram que o aumento de radiação solar incidente com a altitude está relacionado com o aumento da radiação solar direta e a diminuição da radiação solar difusa.

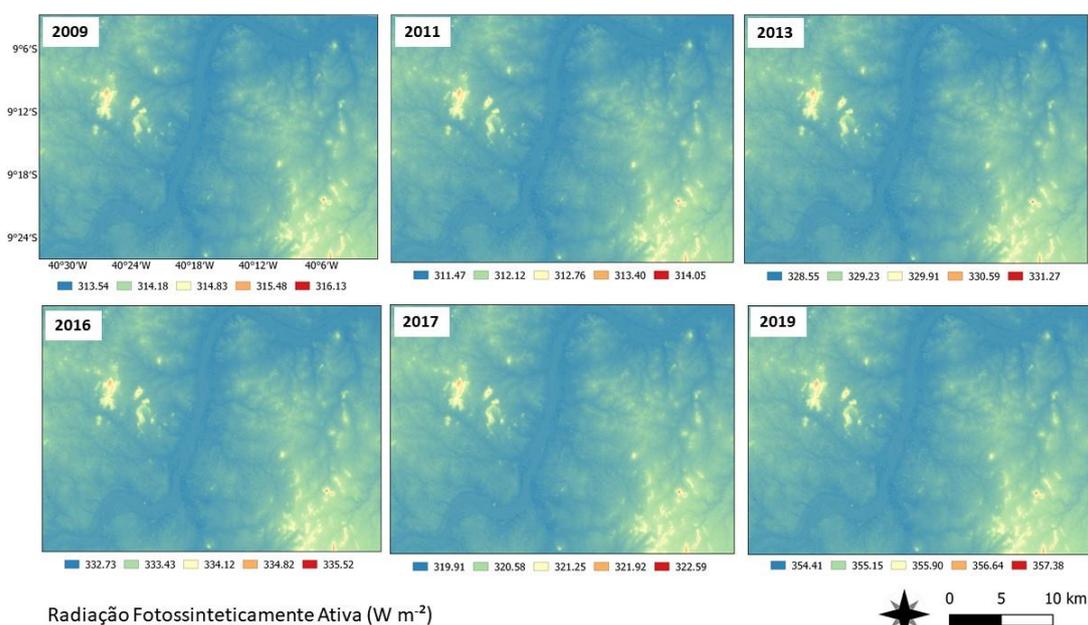


Figura 13. Distribuição da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

Conforme a Figura 13, os anos de 2009 e 2011 apresentaram os menores valores de PAR, tendo variação espacial muito próxima (311,47 a 316,13 W/m^2), com a incidência predominante de 311 a 314 W/m^2 na extensão analisada. Em contrapartida, o ano de 2019 obteve as maiores quantidades de radiação incidente, com variação de 354,41 a 357,38 W/m^2 , com valores majoritários de 354 a 355 W/m^2 distribuídos espacialmente. Souza et al. (2015) encontraram valores de PAR variando de 92 a 370 Wm^{-2} , entre os anos de 2011 e 2013, para a mesma região.

Embora a diferença nas faixas de variação da PAR entre as imagens (Figura 13) seja pequena, essa desigualdade pode ocorrer em decorrência da declinação solar e de alguns fatores que atuam na transmissividade da atmosfera no momento da passagem do satélite, como a presença de nebulosidade e a quantidade de umidade atmosférica, a qual apresentou valores próximos entre as datas, como pode ser observado na Tabela 2.

Dias em que a declinação solar está mais próxima à latitude da região ocasionam maior disponibilidade de radiação na superfície, dessa forma, imagens coletadas em meses mais próximos ao dia em que o Sol atinge a vertical local da região (final de fevereiro) possuem maiores valores de PAR (imagem obtida em abril), demonstrando decréscimo à medida que se distancia desse evento (imagens obtidas em junho).

Os dados de PAR obtidos na estação meteorológica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), estão próximos aos obtidos na estimativa via satélite, que apresentam uma subestimativa nos valores, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6. Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) obtida na estação meteorológica automática do INPE, Petrolina, Pernambuco (PARobs) e estimada via satélite Landsat 5 e 8. (PARest).

Data	Horário	PARobs	PAR est	Desvio Padrão	Erro (%)
04/06/2009	12:36	341.30	313.80	13.75	8.06
10/06/2011	12:37	328.70	311.73	8.48	5.16
30/05/2013	12:50	361.09	328.83	16.13	8.93
10/06/2017	12:47	331.96	320.19	5.88	3.54

Com a incidência da radiação fotossinteticamente ativa inicia-se os processos radiativos. Esses processos estão relacionados com o fracionamento da PAR através da sua interação com a superfície, estando predisposta a ser refletida, absorvida e transmitida, os quais dependem das condições superficiais. Regiões vegetadas tendem a absorver e transmitir mais radiação que regiões de solo exposto (MONTEIRO et al., 2014). Vale ressaltar que fatores como a fisiologia da espécie vegetal, tamanho e geometria das plantas; cor, tamanho, arquitetura e idade das folhas; distribuição espacial da vegetação e ângulo de incidência de raios solares (PEREIRA et al., 2002) afetam diretamente as proporções de fragmentação da PAR.

Ao entrar em contato com a superfície o primeiro processo pelo qual a PAR é submetida é a reflexão, que está diretamente relacionada com o albedo da superfície. A região do Vale do Submédio São Francisco obteve os menores albedos nos anos de 2009 e 2011 (Figura 14), expondo a prevalência de valores oscilando entre 0,026 e 0,14, na maior parte da região, indicando uma menor refletância de radiação solar nessas áreas. Há manifestação de áreas com albedo de 0,251, e variando de 0,363 a 0,475 estando relacionadas a áreas de solo exposto e infraestrutura urbana.

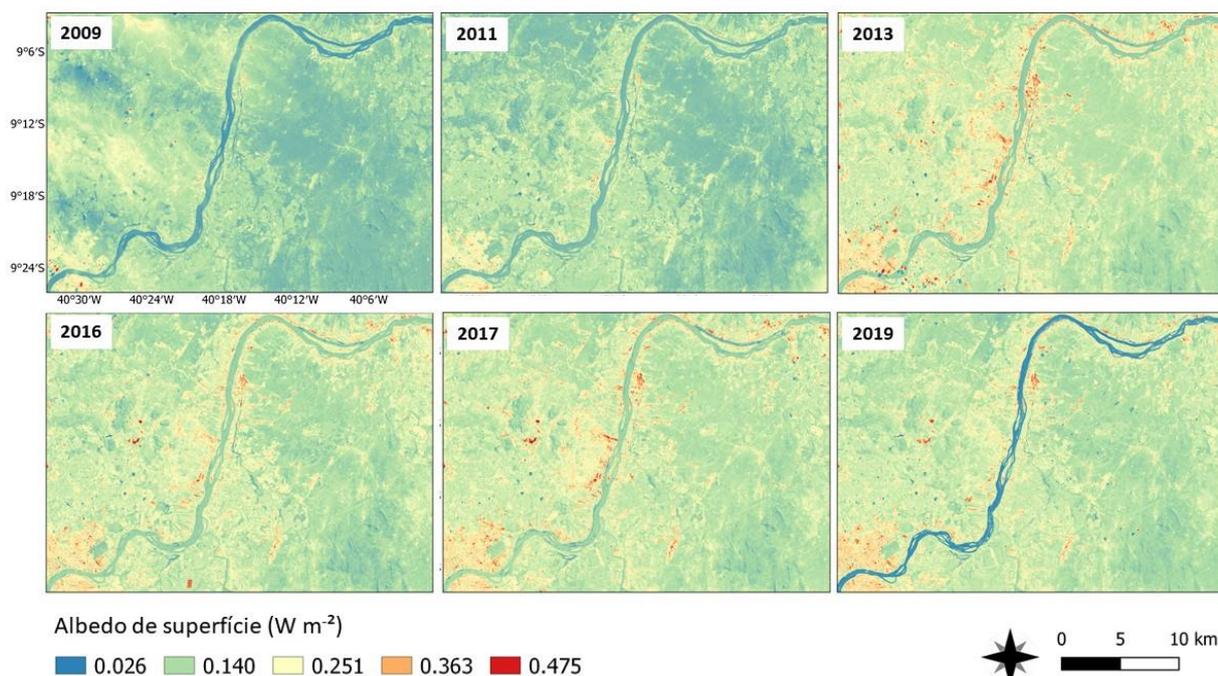


Figura 14. Distribuição espacial do albedo de superfície no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

Nos demais anos, a distribuição espacial do albedo foi semelhante (Figura 14), com 0,14 a 0,251 como faixa de variação predominante, onde os maiores valores dessa variável estão localizados nas áreas de vegetação mais rala, solo exposto e infraestrutura urbana. Áreas voltadas à agricultura, localizadas próximas ao rio São Francisco (Figura 6), demonstraram albedo em torno de 0,251 (Figura 14), albedo característico das zonas agrícolas dessa região (SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2019)

Locais com maiores albedos (0,363 a 0,475) são mais expressivos e regulares nos anos de 2013, 2016, 2017 e 2019 que em 2009 e 2011, sugerindo a existência de mais áreas com ausência de vegetação. Conti (2011) relata que essas áreas que apresentam alta refletância devido ao desmatamento, quando em grandes extensões, resultam na redução de energia térmica disponível e quando agravado pela ausência de nebulosidade (favorecendo o escape da radiação infravermelha), podem causar uma alteração na dinâmica convectiva da região, ocasionando a não formação de correntes convectivas ascendentes, condição desfavorável à formação de chuvas.

De modo geral, regiões de Caatinga (formação florestal e campestre) obtiveram albedo oscilando de 0,026 a 0,251, resultado que está dentro dos padrões de refletância de vegetação natural da Caatinga (SILVA et al., 2019). Áreas que apresentam esse tipo de cobertura possuem menores valores de albedo, pois a presença de vegetação na

superfície altera a dinâmica da reflexão, uma vez que as plantas, sobretudo as de grande porte, possuem alta capacidade de absorção da radiação solar por consequência das reflexões múltiplas no interior do dossel (MONTEIRO et al., 2014).

As áreas de corpos hídricos, sobretudo o rio São Francisco, apresentaram valores de albedo oscilando entre 2,5 e 14 % (Figura 14) corroborando com esses resultados, Silva et al. (2016) e Silva et al. (2019) encontraram valores inferiores a 9% de albedo para os corpos hídricos dessa região.

Nesse sentido, a distribuição e a densidade da vegetação influenciam diretamente o albedo da superfície, afetando conseqüentemente a quantidade de PAR refletida. Na Figura 15 observa-se a variação do albedo médio em prol das classes de vegetação (Tabela 5), nota-se que há uma associação inversamente proporcional entre a densidade vegetal e a refletância da superfície, conforme já reportado por Pavão et al. (2015); Pavão et al. (2017).



Figura 15. Variação do albedo de superfície médio dos anos avaliados em função da classificação da cobertura vegetal de acordo com o IBVL no Vale do Submédio São Francisco.

A fração refletida da radiação fotossinteticamente ativa (PARr) segue o mesmo padrão de distribuição do albedo, conforme exposto na Figura 16, onde as maiores quantidades de PAR foram refletidas em regiões que apresentaram menores densidades de vegetação, solo exposto e áreas urbanas.

Os anos de 2009 e 2011 obtiveram nas áreas de vegetação nativa (formação florestal e campestre) quantidades refletidas de 15,03 a 49,01 Wm^{-2} de radiação (Figura 16), correspondendo a 2,6 e 14% da PAR, respectivamente. Nos demais anos essas regiões exibiram valores de PARr em torno de 49,01 Wm^{-2} . Andrade et al. (2014) encontraram a PAR refletida variando de 0 a 16 Wm^{-2} , em áreas de Mata Atlântica,

valores relativamente inferiores à Caatinga devido ao fato de que a Mata Atlântica tem biomassa mais densa.

Nas zonas agrícolas, a PARr apresentou variação de 49,01 a 83,54 Wm^{-2} (14 a 25,1% da PAR incidente) nos anos de 2009 e 2011 e valor de 83,54 Wm^{-2} em 2013, 2016, 2017 e 2019. Em áreas urbanas e de solo exposto estes valores se situaram entre 116,33 e 150,75 Wm^{-2} , representando 36,3 e 47,5%, respectivamente, da radiação fotossinteticamente ativa incidente.

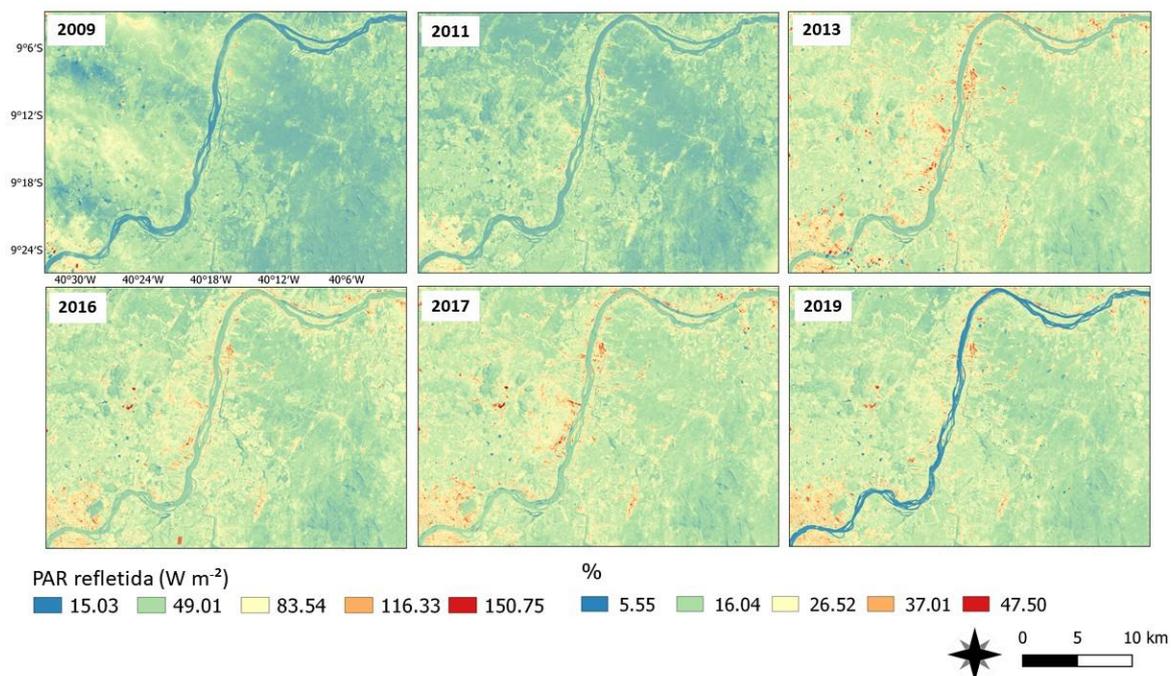


Figura 16. Distribuição da fração refletida (PARr) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, em duas unidades de medida (Wm^{-2} e porcentagem - %).

A irregularidade na distribuição dessa fração da radiação é consequência direta da ação da refletância da superfície. Logo, áreas vegetadas, sobretudo que apresentam vegetação de grande porte, tendem a ter menor albedo em decorrência dos processos múltiplos de reflexão no interior do dossel, como já enfatizado anteriormente, e assim possuem uma menor quantidade de PAR refletida. Parker et al. (2005) encontraram valores de refletância de dosséis inferiores em regiões de florestas decíduas na estação chuvosa, quando comparado à mesma região na estação seca, evidenciando o efeito da presença de folhas no albedo. Lopes et al. (2013) observaram que, em áreas de Mata Atlântica, o albedo da superfície variou de 8 a 17% entre as estações chuvosa e seca.

Em contrapartida, regiões que possuem a superfície mais exposta, apresentam uma maior capacidade de reflexão devido à ausência de vegetação, de modo que a superfície

“nua”, sem nenhum componente que possa aprisionar essa radiação, tende a refleti-la. Consequências desse tipo de interação superfície-atmosfera inclui a diminuição do efeito termohidroregulador da biomassa, levando a conversão prioritária do saldo de radiação disponível à fluxo de calor sensível, responsável pelo aquecimento do ar (SANTOS et al. 2014; FAUSTO et al., 2016; PAVÃO et al. 2017).

A quantidade de PAR absorvida (PARa) pela vegetação obteve variação de 0 a 267,73 Wm⁻², alcançando valores de absorção de até 74,05% da PAR incidente (Figura 17). O ano de 2009, evidentemente, apresentou os maiores valores de PARa distribuídos espacialmente na maior parte do território, onde houve quantidades de radiação absorvidas entre 133,86 e 267,73 Wm⁻² nas áreas de formação florestal, campestre, pastagem e agricultura.

Os demais anos exibiram uma distribuição espacial similar, na qual os maiores valores da radiação absorvida foram registrados nas áreas de agricultura, caracterizando a fração de 37,03 a 74,05 % (133,86 a 267,73 Wm⁻²) da PAR incidente.

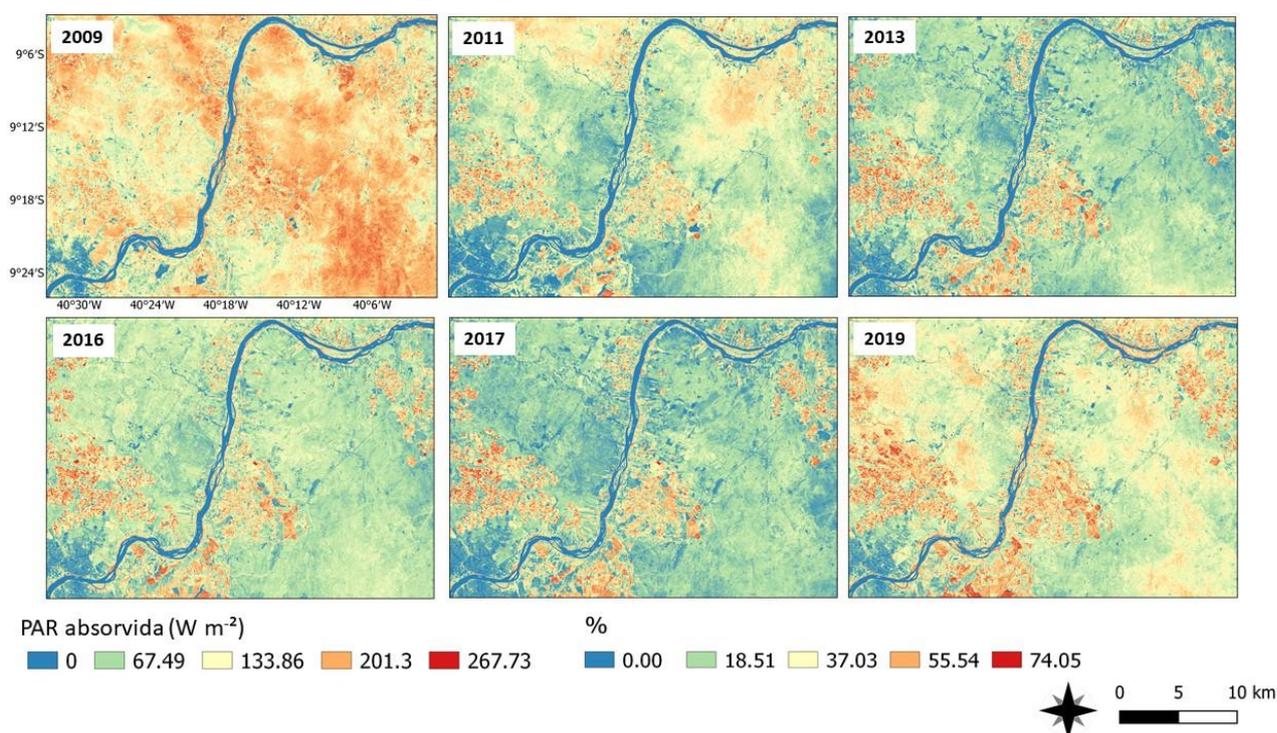


Figura 17. Distribuição da fração absorvida (PARa) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, em duas unidades de medida (Wm⁻² e porcentagem - %).

As áreas de formação florestal e campestre nos anos de 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019 obtiveram variação na PARa de 0 a 133,86 Wm⁻², correspondendo a 0 e 37,03% da PAR, respectivamente, sendo visivelmente inferior ao ano de 2009 (Figura 17). Souza et

al. (2015) encontraram a variação de 24 a 61% na fração absorvida da PAR pela vegetação da Caatinga, no município de Petrolina entre os meses de janeiro de 2012 a janeiro de 2013.

Nota-se que as áreas agrícolas possuem uma maior quantidade de PAR absorvida, situação decorrente, provavelmente, do maior IAF dessas áreas quando comparadas à vegetação natural. A eficiência na absorção da radiação interceptada está diretamente relacionada ao índice de área foliar, logo maiores densidades de biomassa absorvem uma maior quantidade de radiação incidente.

A fração transmitida da PAR (PART) mostrou um padrão de distribuição muito próximo entre os anos (Figura 18), em que as maiores proporções da PAR (128,78 a 255,23 Wm^{-2}) foram transmitidas nas regiões de mata nativa, com exceção do ano de 2009, no qual essas áreas apresentaram menores valores de radiação transmitidos através do dossel (0 a 128,78 Wm^{-2}), provavelmente pelos maiores índices de vegetação registrados nesta data.

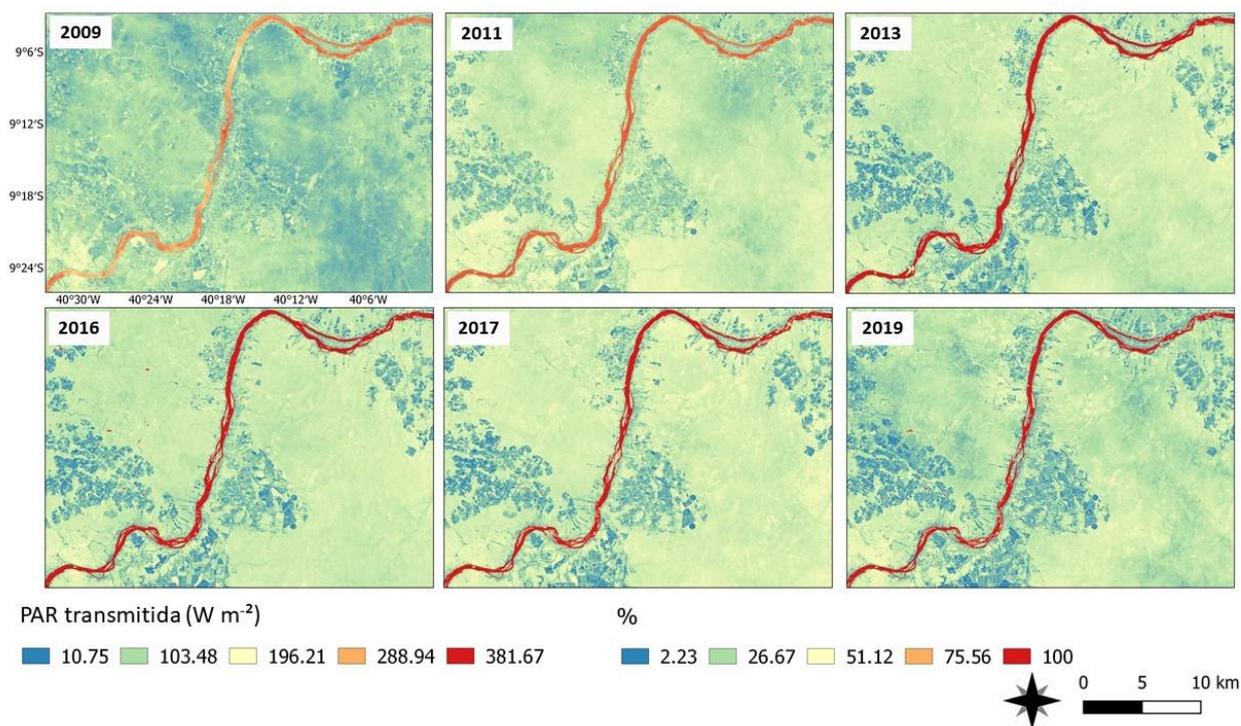


Figura 18. Distribuição da fração transmitida (PART) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019., em duas unidades de medida (Wm^{-2} e porcentagem - %).

As regiões agrícolas mostraram ter uma menor quantidade de radiação transmitida em relação às demais áreas vegetadas (Figura 18), tendo variação de 10,75 a 103,48 Wm^{-2} , representando de 2,23 a 26,67% da PAR. Por possuírem uma vegetação de menor porte,

os processos radiativos que agem nessas áreas em maior quantidade é a absorção e reflexão, conforme pode ser observado nas Figuras 16 e 17.

As áreas que contém vegetação em menor densidade vegetal possui maior quantidade de radiação transmitida por ter uma menor capacidade de interceptar radiação, logo dosséis mais volumosos permitem a passagem de menos radiação solar (ANDRADE et al., 2014). Estudando florestas tropicais decíduas no México, em diferentes estações (chuvosa e seca), Parker et al. (2005) evidenciaram que na estação chuvosa a fração de transmitância da PAR foi inferior à da estação seca, justamente pela maior presença de folhas, uma vez que se trata de uma floresta decídua. Em uma área de Mata Atlântica, no estado de Alagoas, Andrade et al. (2014) encontraram variação da PAR transmitida entre 0 e 40Wm^{-2} .

Dentre as subdivisões da PAR na superfície, a parcela transmitida que é refletida pelo solo e absorvida pela porção inferior do dossel das plantas (PAR_{ra}) é a que representa a menor proporção. Nota-se na Figura 19 que a variação da PAR_{ra} atinge até 5% da PAR incidente. O ano de 2009 destaca-se por apresentar maiores valores de PAR_{ra} distribuídos espacialmente (Figura 19) com variação de 3,75 a 5% da PAR ($12,7$ a $16,93\text{ Wm}^{-2}$), possivelmente por ter uma maior quantidade de vegetação, os processos refletivos que ocorrem no interior da vegetação favorecem a reflexão da radiação pelo solo e absorção pela região foliar abaxial.

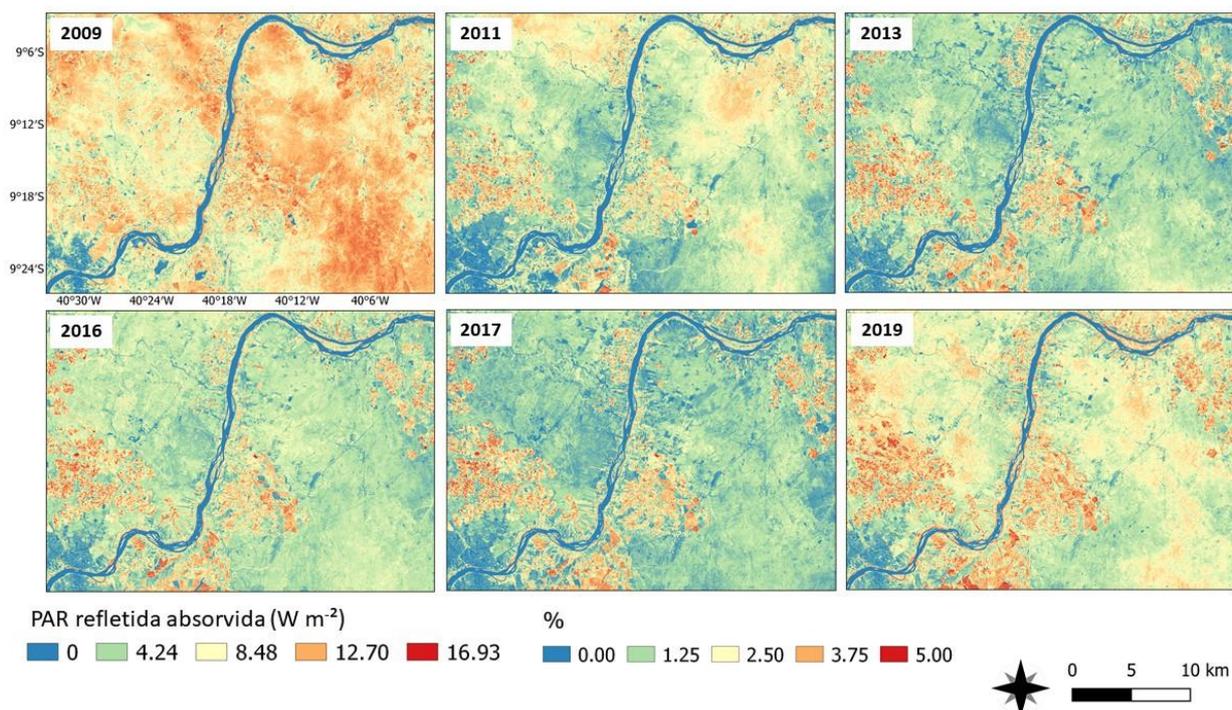


Figura 19. Distribuição da fração refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior da vegetação (PARra) da Radiação Fotossinteticamente Ativa no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, em duas unidades de medida (Wm^{-2} e porcentagem - %).

Um leve aumento na distribuição da PARra pode ser observado nos anos de 2011 e 2019 quando comparados a 2013, 2016 e 2017, sobretudo nas áreas de Caatinga, onde obteve-se valores majoritários entre 4,24 e 12,70 Wm^{-2} (1,25 e 3,75%). Em 2013, 2016 e 2017, tem-se uma disposição da PARra similar, com variação de 0 a 4,24 Wm^{-2} (0 a 1,25%) nas áreas de mata nativa. Estudos realizados por Andrade et al. (2014) encontraram variação entre 0 a 1,5 Wm^{-2} deste componente da PAR, em florestas de Mata Atlântica, evidenciando a absorção da maior parte da radiação que é transmitida pelas folhas e galhos do interior do dossel.

Estatisticamente, claras relações entre os componentes da PAR e o índice de área foliar podem ser observadas na Figura 20. Com pouca distinção entre as datas estudadas, nota-se relações diretamente proporcionais entre as frações absorvidas (PARa e PARra) e o índice de área foliar com coeficiente de determinação (R^2) variando de 0,89 a 0,98 (Tabela 7), indicando que quando se tem maiores índices de área foliar tem-se uma maior absorção de radiação solar, obviamente pelo maior número de folhas expostas a essa radiação. O IAF explica a variação da PAR absorvida pelo dossel de 89 a 98%, sendo

significativa ao nível de confiança de 99% e probabilidade $p < 0,01$. O coeficiente de Pearson (r) variou de 0,94 a 0,99, indicando correlação muito forte entre as duas variáveis.

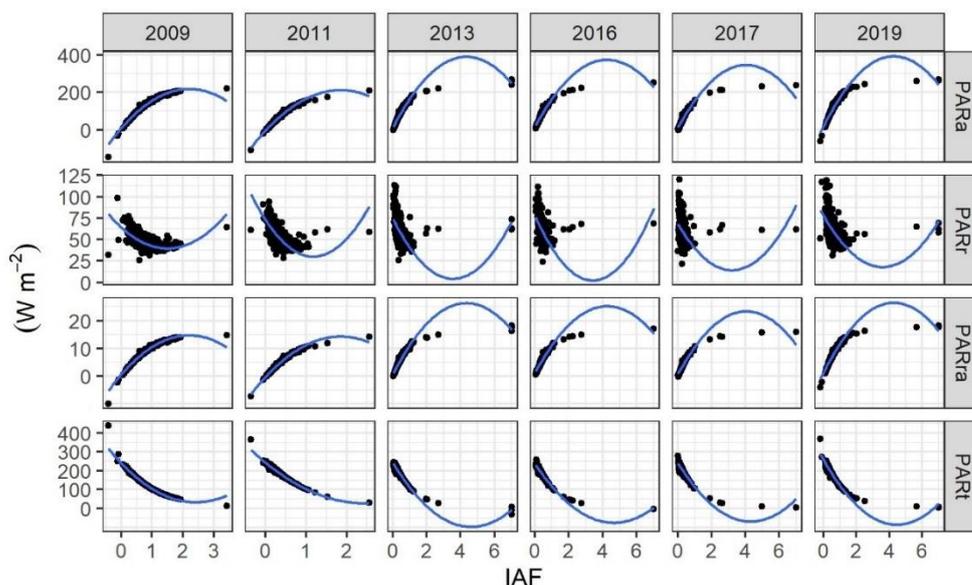


Figura 20. Modelo polinomial de segunda ordem entre o Índice de Área Foliar (IAF) e os componentes do balanço da PAR, Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida (PARa), refletida (PARr), refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior da vegetação (PARra) e transmitida (PART), nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, para área de vegetação nativa no Vale do Submédio São Francisco.

No que se refere à radiação refletida, apesar de nos ajustes encontrados apresentarem os menores valores de R^2 (Tabela 7), nota-se que há uma tendência à diminuição da radiação refletida à medida que se aumenta o índice de área foliar, comportamento esperando conforme os dados expostos na Figura 15. Com relação ao r , observou-se variação de 0,42 a 0,76, configurando uma correlação de moderada a forte (Tabela 6).

A fração transmitida da PAR e o IAF apresentaram um R^2 variando de 0,90 a 0,98 e r de 0,95 a 0,99, caracterizando uma correlação muito forte, em que há maior transmissão de radiação através do dossel em áreas que possuem menor índice de área foliar, pois, as folhas são agentes atenuantes desse componente através da interceptação e, sua ausência, permite que a PAR atinja o solo com uma maior facilidade, corroborando com Parker et al. (2005), que encontraram maiores valores de transmitância na estação seca, em florestas caducifólias, que por estarem sem folhas (ausência de IAF) permitiram a passagem de uma maior quantidade de radiação através do dossel. Resultado também encontrado por Andrade et al. (2014) que descrevem uma redução na radiação que é

transmitida através do dossel à medida que se aumenta o IAF em áreas de Mata Atlântica em Alagoas.

Tabela 7. Coeficientes da equação do modelo polinomial de segunda ordem ($ax^2 + bx + c$), coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de correlação de Pearson (r) obtidos entre o Índice de Área Foliar (IAF) e os componentes de e os componentes do balanço da PAR, Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida (PARa), refletida (PARr), refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior da vegetação (PARra) e transmitida (PARt), nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019, no Vale do Submédio São Francisco.

Ano	Componente	a	b	c	R ²	r
2009	PARa	-43.41	191.24	8	0.98**	0.99**
	PARr	10.96	-32.89	64.4	0.55**	0.74**
	PARra	-2.93	12.90	0.5	0.98**	0.99**
	PARt	35.31	-170.81	240.9	0.98**	0.99**
2011	PARa	-62.24	231.58	-3.3	0.99**	0.99**
	PARr	30.68	-72.37	72.8	0.58**	0.76**
	PARra	-4.20	15.62	-0.2	0.99**	0.99**
	PARt	35.49	-174.23	242.6	0.97**	0.99**
2013	PARa	-20.06	174.48	11	0.95**	0.97**
	PARr	5.57	-39.58	74.6	0.35**	0.59**
	PARra	-1.35	11.77	0.7	0.95**	0.97**
	PARt	15.76	-146.09	242.6	0.96**	0.98**
2016	PARa	-19.74	168.52	14	0.90**	0.95**
	PARr	6.54	-44.77	79	0.27**	0.52**
	PARra	-1.33	11.37	0.9	0.90**	0.95**
	PARt	14.44	-134.58	239.2	0.93**	0.97**
2017	PARa	-20.43	165.30	11.6	0.89**	0.94**
	PARr	5.25	-33.62	68.2	0.18**	0.42**
	PARra	-1.38	11.15	0.8	0.89**	0.94**
	PARt	16.50	-142.46	239.8	0.90**	0.95**
2019	PARa	-20.40	174.49	19.4	0.95**	0.97**
	PARr	4.62	-33.24	77.8	0.33**	0.57**
	PARra	-1.38	11.77	1.3	0.95**	0.97**
	PARt	17.08	-152.53	256.4	0.96**	0.98**

**ajuste significativo à 1% de probabilidade ($p < 0,01$) pelo teste t-student.

De acordo com o que é possível observar na Figura 20, nota-se a importância da existência de folhagens no fracionamento e utilização da PAR, dessa forma ressalta-se a relevância de existir cobertura vegetal, sobretudo em áreas urbanas, tendo em vista os benefícios do termorregulamento vegetal. Em estudos realizados na Caatinga por Fernandes et al. (2019), buscando caracterizar o balanço de energia, encontrou-se maiores frações do saldo de radiação sendo direcionada ao calor sensível em áreas de vegetação

mais rala e de menores em áreas de maior densidade, indicando um maior aquecimento da superfície em áreas menos densas.

Com relação ao balanço da radiação fotossinteticamente ativa em favor das diferentes classes de vegetação, observa-se na Figura 21 que à proporção que se aumenta a densidade de vegetação (a classe 3 – vegetação subarbustiva arbustiva rala a 11 – arbórea muito densa) há um decréscimo na PART e PARr e, um aumento na PARa e PARra, em todas as datas analisadas.

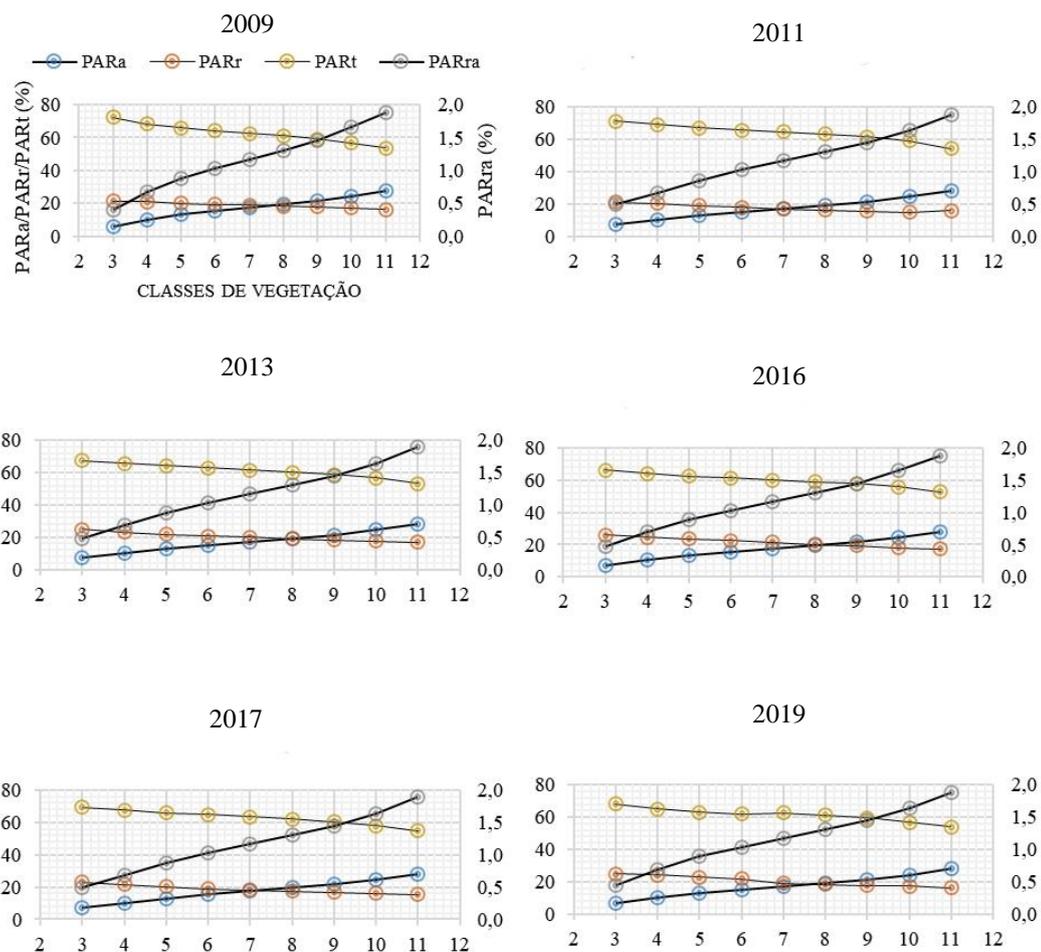


Figura 21. Fracionamento médio da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) em áreas de vegetação natural de acordo com o IBVL no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

Os dados expostos na Figura 21 validam as informações já mencionadas relacionadas a como a cobertura vegetal densa tem uma maior capacidade de absorção, menor reflexão e menor transmissão da radiação fotossinteticamente ativa. Tendo, portanto, um maior aproveitamento deste recurso quando comparada aos níveis mais baixos de densidade vegetal. Além disso, nota-se na distribuição da PAR que a maior

proporção, nesse tipo de cobertura do solo, é transmitida, correspondendo de 50 a 80% da PAR incidente. Enquanto os demais componentes variam de 5 a 30% para a PARa, de 17 a 20% para a PARr e de 0,4 a 2% para a PARra. Vale ressaltar que a distribuição da PAR é semelhante em todas as datas analisadas para a cobertura de mata nativa.

Áreas mais densas, como a da classe 11 (vegetação arbórea muito densa) possui o fracionamento médio da PAR em: 50% transmitida, 30% absorvida, 17% refletida e 2% refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior do dossel. Em contrapartida, áreas com vegetação mais escassas, como a classe 3 (vegetação subarbustiva arbustiva rala) possui o fracionamento médio da PAR em: 80% transmitida, 8% absorvida, 20% refletida e 0,5% refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior do dossel.

As subdivisões da PAR na classificação do MapBiomias considera os diferentes tipos de cobertura do solo existentes na área estudada e podem ser observadas na Figura 6. No que se refere à distribuição da PAR nessas áreas, nota-se que o padrão de distribuição é semelhante nas datas avaliadas, em que se tem distintos fracionamentos entre as classes.

Em áreas de vegetação natural (3 – Formação Florestal, 4 – Savana e 12 – Formação Campestre) as maiores porções da PAR são destinadas aos componentes PART e PARa, seguidos por PARr e PARra. Em áreas de agricultura (15 – Pastagem, 20 – Cana-de-açúcar, 21 – Agricultura e Pastagem e 41 – Lavouras temporárias), observa-se que de 40 a 50% da PAR é transmitida, se aplicando a mesma proporção à porção absorvida, enquanto aproximadamente 20% é correspondente aos componentes PARr e PARra. Áreas de cultivo permanente (36) tem maior semelhança com as proporções de áreas de vegetação natural, devido ao seu porte e área foliar (Figura 22).



Figura 22. Fracionamento médio da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) em classes de uso e cobertura do solo obtidas do MapBiomias no Vale do Submédio São Francisco, nos anos de 2009, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2019.

De acordo com Parker et al. (2005) florestas do México de comportamento caducifólio, mais densas que a Caatinga, absorve cerca de 95% da radiação fotossinteticamente ativa incidente, da qual 50% é absorvida pelas folhas, 25% por tecidos não foliares, 20% pelo solo, os 5% restantes é refletido pelo dossel.

Em contrapartida, áreas exclusivas de vegetação natural do Vale do Submédio São Francisco (Figura 22) têm cerca de 25% de radiação absorvida, 13% refletida e os 62% restantes é destinado, provavelmente ao aquecimento do solo. Áreas urbanas e sobre o rio, houve distribuições incomuns da radiação devido ao comportamento destas superfícies em relação à porção fotossinteticamente ativa da radiação solar.

De uma maneira geral, nota-se que o tipo de cobertura afeta diretamente a distribuição de radiação fotossinteticamente ativa na superfície, sendo essa mais aproveitada em vegetações que apresentam maiores densidades. A partir dos dados expostos observa-se que a maior parte da PAR incidente não é absorvida pelas plantas, sendo, portanto, destinada a outros fins como aquecimento do solo e da água, refletida novamente para atmosfera, dentre outros.

Conforme os dados apresentados, enfatiza-se a necessidade de mais estudos que busquem analisar os processos radiativos em florestas nativas, principalmente que visem caracterizar os impactos da remoção dessa cobertura vegetal e de sua conversão em áreas com outras finalidades na disponibilidade de energia na superfície e na alteração dos processos biofísicos uma vez desequilibrados no ecossistema. Para que assim haja o fornecimento de mais informações que auxiliem o planejamento ambiental almejando a preservação do bioma.

6. Conclusões

A vegetação na região do Vale do Submédio São Francisco possui grande heterogeneidade variando de classificações arbustivas ralas até arbóreas muito densas, apresentando assim, uma complexa relação com o balanço de radiação fotossinteticamente ativa à superfície.

A análise espaço-temporal dos componentes do balanço de radiação fotossinteticamente ativa sobre a floresta tropical sazonalmente seca mostrou que a maior parte da PAR incidente foi destinada a transmissão (de 50 a 80%), seguida da absorção (5 a 30%) e reflexão (17 a 20%), variando de acordo com a densidade da vegetação.

A relação existente entre o Índice de Área Foliar indica que à medida que se aumenta a densidade de vegetação, há um decréscimo na PAR_t e PAR_r e, um aumento na PAR_a e PAR_{ra} . Assim, a cobertura vegetal densa tem uma maior capacidade de absorção, menor reflexão e menor transmissão da radiação fotossinteticamente ativa, configurando um maior aproveitamento deste recurso quando comparada aos níveis mais baixos de densidade vegetal.

A distribuição e a densidade da vegetação influenciam diretamente o albedo da superfície, afetando conseqüentemente a quantidade de PAR refletida.

O balanço de radiação da PAR possui diferentes fracionamentos de acordo com a superfície, sendo essa radiação mais aproveitada em áreas de florestas nativas e agricultura (maior absorção).

O índice de área foliar está diretamente relacionado com o fracionamento da PAR na região, sendo um fator determinante em quanto dessa radiação será destinada para o aquecimento da superfície, evidenciando a importância da presença de vegetação sobretudo em áreas urbanas, tendo em vista os benefícios do termorregulamento vegetal.

A maior parte da PAR incidente não é absorvida pelas plantas, sendo, portanto, destinada a outros fins como aquecimento do solo e da água, refletida novamente para atmosfera, dentre outros.

A eficiência na absorção da radiação interceptada está diretamente relacionada ao índice de área foliar, logo maiores densidades de biomassa absorvem uma maior quantidade de radiação incidente.

Os modelos polinomiais de segunda ordem ajustaram-se melhor ao IAF com a PAR transmitida, PAR absorvida e PAR refletida pelo solo e absorvida pela parte inferior do dossel, com coeficientes de correlação classificados como muito fortes, significativos ao nível de confiança de 99% e probabilidade $p < 0,01$.

7. Sugestões

Há carência de mais estudos que busquem analisar os processos radiativos nas áreas de Caatinga, assim sugere-se o desenvolvimento de trabalhos científicos que visem, principalmente, caracterizar os impactos da remoção dessa cobertura vegetal de energia na superfície e na alteração dos processos ecossistêmicos. Para que assim haja o fornecimento de mais informações que auxiliem o planejamento ambiental almejando a preservação do bioma.

8. Referência bibliográficas

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W.G. M. SEBAL Surface Energy Balance Algorithm for Land – **Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation**, v 1, P.97, 2002.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, A.; MOURA, M. A. L.; SANTOS, A. B. D.; CARNEIRO, R. G.; SILVA JÚNIOR, R. S. D. Incident and reflected Photosynthetically Active Radiation above and below canopy in the Mata Atlantica forest in Coruripe, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 68-79, 2014.

ASRAR, G.; MYNENI, R. B.; KANEMASU, E. T. Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements. **Theory and Applications of Optical Remote Sensing** (G. Asrar, Ed.), Wiley, New York, p. 252-296, 1989.

BANDA, K.; DELGADO-SALINAS, A.; DEXTER, K. G.; LINARES-PALOMINO, R.; OLIVEIRA-FILHO, A.; PRADO, D., ... PENNINGTON, R. T. Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. **Science**, Washington, EUA, v.353, n. 6306, p. 1383-1387, 2016.

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

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000.

BATISTA, J. L. O.; SANTOS, R. L. Detecção de mudança da cobertura e uso do solo em região semiárida: enfoque para o Município de Teofilândia-Ba. **Revista de Geografia (UFPE)**. v. 30, n. 1, 2013.

BEZERRA, J. M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife – PE, 2013.

BITENCURTI, D. P.; DE MELO, F. P.; GOIS, D. V.; RUIZ-ESPARZA, J.; DE SOUZA RIBEIRO, A.; FERRARI, S. F.; MELO, R. Análise multitemporal do desmatamento nos municípios de Canindé de São Francisco e Poço Redondo, SE. **Geosul**, v. 32, n. 63, p. 117-139, 2017.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; FREIRE, E. C.; SILVA, B. B. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: AZEVÊDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 1309 p. cap. 20. v. 2, 2008.

CALISTO JÚNIOR, J. T.; DRUMOND, M. A. Estudo comparativo da estrutura fitossociológica de dois fragmentos de Caatinga em níveis diferentes de conservação. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 345-355, 2014.

-
- CARON, B. O.; SOUZA, V. Q. D.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; BAMBERG, R.; ELOY, E. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 833-842, 2012.
- CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. Susceptibilidade Ambiental A Salinização Das Terras Em Municípios Da Microrregião De Petrolina - Pernambuco - Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 16, n. 56, p.160-172, 2015.
- CHANDER, G.; MARKHAN, B. Revised Landsat 5 - TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.
- CHAVES, I. B.; LOPES, V. L.; FFOLLIOTT, P. F.; PAES-SILVA, A. P. Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. **Revista Caatinga**, v.21, n.2, p.204-213, 2008.
- COCKSHULL, K. E. Crop environment. **Acta Horticulturae**, n.312, p.77-85, 1992
- COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de superfície celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Rev. Geogr. Acadêmica**. v.7, n.1, p.31-45, 2013.
- CONTI, J. B. **Clima e meio ambiente**. 7 ed. São Paulo: Atual, 2011. 96 p.
- DANELICHEN, V. H.; BIUDES, M. S.; VELASQUE, M.; MACHADO, N. G.; GOMES, R. S.; VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. S. Estimating of gross primary production in an Amazon-Cerrado transitional forest using MODIS and Landsat imagery. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 3, p. 1545-1564, 2015.
- DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; GOWARD, S.N.; PRINCE, S.D.; KUSTAS, W.P. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.39, p.141-152, 1992.
- DEVORE, J. L. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências. São Paulo, SP: Thomson Pioneira, 2006. 706p.
- DI MAIO, A.; RUDORFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PEREIRA, G.; MOREIRA, M. A.; SAUSEN, T. M.; FLORENZANO, T. G. **Sensoriamento remoto**. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.cdcc.usp.br/cda/oba/eb/sensoriamento_remotoalta_resolucao_2008.pdf>. Acesso em setembro de 2019.
- DRUMOND, M. A.; KIILL, L. H. P.; NASCIMENTO, C. D. S. Inventário e sociabilidade de espécies arbóreas e arbustivas da caatinga na região de Petrolina, PE. **Brasil Florestal**, v. 21, n. 74, p. 37-43, 2002.
- ELOY, E.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F. Conversion Efficiency of Photosynthetically Active Radiation Into Acacia mearnsii Biomass. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 2, 2018.
- FABRICANTE, J. R.; ANDRADE, L. A.; DIAS-TERCEIRO, R. G. Divergências na composição e na estrutura do componente arbustivo-arbóreo entre duas áreas de caatinga na região do Submédio São Francisco (Petrolina, PE/Juazeiro, BA). **Biotemas**, v. 25, n. 3, p. 97-109, 2012.
- FAUSTO, M.A.; ANGELINI, L.P.; MARQUES, H.O.; FILHO, A.S.; MACHADO, N.G. Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato

Grosso. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 2, p. 350-361, 2016.

FERNANDES, G. S. T.; LOPES, P. M. O.; DE OLIVEIRA, V. B.; SILVA, D. A. O. Energy balance by remote sensing in Caatinga fragments in southern Piauí. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, p. 131-137, 2019.

FERREIRA, J. M. S.; DOS SANTOS FERREIRA, H.; DA SILVA, H. A.; DOS SANTOS, A. M.; GALVÍNCIO, J. D. Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 904-922, 2012.

FIGUEIREDO, D. Conceitos básicos de sensoriamento remoto. **São Paulo**, 2005. Disponível em: <http://www.clickgeo.com.br/wp-content/uploads/2013/04/conceitos_sm.pdf>. Acesso em setembro de 2019.

FRANCISCO, P. R. M.; RIBEIRO, G. N.; MORAES NETO, J. M.; ARAGÃO, K. P. Avaliação da Degradação da Caatinga do Município de Sumé-PB Estimado pelo Volume de Biomassa da Vegetação Lenhosa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 01, p. 117-129, 2014.

FRANCISCO, P. R. M. **Modelo de mapeamento da deterioração do Bioma Caatinga da bacia hidrográfica do Rio Taperoá, PB**. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Campina Grande, Paraíba, 97f, 2013.

GALLO, K. P.; DAUGHTRY, C. S. T. Techniques for measuring intercepted and absorbed Photosynthetically Active Radiation in Corn Canopies 1. **Agronomy journal**, v. 78, n. 4, p. 752-756, 1986.

GIRI, U.; PAUL, N.; GIRI, S.; BANDYOPADHYAY, P.; NANDA, M. K. Effect of sulphur and different irrigation regimes on PAR distribution, canopy temperature, yield and water use efficiency of Groundnut (*Arachis hypogaea L.*). **International journal of Agriculture, Environment and Biotechnology**, v. 10, n. 2, p. 177, 2017.

GITELSON, A. A. Remote estimation of fraction of radiation absorbed by photosynthetically active vegetation: generic algorithm for maize and soybean. **Remote sensing letters**, v. 10, n. 3, p. 283-291, 2019.

GITELSON, A. A.; PENG, Y.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E. Productivity, absorbed photosynthetically active radiation, and light use efficiency in crops: Implications for remote sensing of crop primary production. **Journal of plant physiology**, v. 177, p. 100-109, 2015.

GUSMÃO, A. C. V. L.; SILVA, B. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GALVÍNCIO, D. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1107-1114, 2012.

HOLANDA, A. C.; LIMA, F. T. D.; SILVA, B. M.; DOURADO, R. G.; ALVES, A. R. Estrutura da vegetação em remanescentes de caatinga com diferentes históricos de perturbação em Cajazeirinhas (PB). **Revista Caatinga**, v. 28, n. 4, p. 142-150, 2015.

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

INMET. **Normal climatológica**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: junho de 2019.

JESUS, J. B.; GAMA, D. C.; DO NASCIMENTO JÚNIOR, J. M.; FERNANDES, M. R. M.; FERNANDES, M. M. Fragmentação florestal em região semiárida no Nordeste do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, n. 1, 2019.

KANNAUJIYA, V. K.; SINHA, R. P. Impacts of diurnal variation of ultraviolet-B and photosynthetically active radiation on phycobiliproteins of the hot-spring cyanobacterium *Nostoc* sp. strain HKAR-2. **Protoplasma**, v. 254, n. 1, p. 423-433, 2017.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012. 431 p.

LINS, F. A. C. **Avaliação de parâmetros biofísicos em anos seco, normal e chuvoso da bacia hidrográfica do riacho Exu no sertão de Pernambuco a partir de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 72f, 2018.

LIU, W.T.; MASSAMBANI, O.; FESTA, M. Normalized difference vegetation index for the South American continent used as a climatic variability indicator. In: **International Symposium on Remote Sensing of Environment**, 24, 1991, Rio de Janeiro. Proceedings... Ann Arbor: University of Michigan, p.725-732, 1991.

LOIOLA, M. I. B.; ROQUE, A. A.; OLIVEIRA, A. C. P. Caatinga: Vegetação do semiárido brasileiro. **Revista Ecologi@: Artigos de Divulgação**, v. 4, p. 14-19, 2012.

LOPES, I.; GUIMARÃES, M.; MELO, J. M. M.; RAMOS, C. M. Carvalho. Balanço Hídrico Em Função De Regimes Pluviométricos Na Região De Petrolina-Pe. **Brazilian Journal Of Irrigation And Drainage - Irriga.**, v. 22, n. 3, p.443-457, 18 jun. 2018.

LOPES, P. M.; VALERIANO, D. M.; SILVA, B. B. D.; MOURA, G. B. D. A.; SILVA, A. O. D. Simulação do saldo de radiação na Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 780-789, 2013.

MACHADO, C. C.; SILVA, B. D.; DE ALBUQUERQUE, M. B.; GALVÍNCIO, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM-Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014.

MAPBIOMAS. **MAPBIOMAS**. Disponível em: <http://mapbiomas.org>. Acesso em: 10/11/2019.

MARTINS, V. S.; NOVO, E. M.; LYAPUSTIN, A.; ARAGÃO, L. E.; FREITAS, S. R.; BARBOSA, C. C. Seasonal and interannual assessment of cloud cover and atmospheric constituents across the Amazon (2000–2015): Insights for remote sensing and climate analysis. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 309-327, 2018.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional. **Semiárido brasileiro**. 2018. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/semiario-brasileiro>. Acesso em: agosto de 2019.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Biomass: Caatinga**. 2017. Disponível em: . Acesso em: abril de 2019.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009.

MONTEIRO, P. F. C.; FONTANA, D. C.; SANTOS, T. V. D.; ROBERTI, D. R. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia**, Campinas. v. 73, n. 1, p. 72-80, 2014.

MONTEITH, J.L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany**, v. 29, p.17- 37, 1965.

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

MOREIRA, M. A.; ASSUNÇÃO, G. V. **Princípios básicos, metodologias e aplicações de sensoriamento remoto na agricultura**. INPE, São José dos Campos, 1997. 138p.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Landsat Science**. 2020. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/mission-details/>> . Acesso em junho de 2020.

NOVAIS, J. W. Z.; SANCHES, L.; DIAS, V. R. M.; MACHADO, N. G.; SILVA, L. B.; AQUINO, A. M. Variação espaço-temporal da par refletida pelo solo e transmitida pelo dossel em floresta inundável no pantanal mato-grossense. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1502-1513, 2018.

NUNES, R. L. C.; SOBRINHO, E.; SILVA, S. T. A.; SANTOS, W. O.; MANIÇOBA, R. M. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA/PAR) versus radiação global em Mossoró, RN. In: **Workshop internacional de inovações tecnológicas na irrigação**, Fortaleza, CE, 2012.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; JARENKOV, J. A.; RODAL, M. J. N. Floristic relationships of seasonally dry forests of eastern South America based on tree species distribution pattern. In: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. **Neotropical savannas and seasonally dry forests**. Boca Raton (EUA): CRC Press, p. 159-190, 2006.

OLIVEIRA, L. A. M.; AZEREDO, R. A.; ARAÚJO, G. L.; MANTOVANI, E. C. Estimativa de produção em áreas irrigadas sob o cultivo da cultura do milho utilizando imagens de satélites. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 10, n. 1, p. 400-409, 2016.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 21, 166-174, 2006.

ORTEGA, A. C.; SOBEL, T. F. Desenvolvimento Territorial E Perímetros Irrigados: Avaliação Das Políticas Governamentais Implantadas Nos Perímetros Irrigados Bebedouro E Nilo Coelho Em Petrolina (Pe). **Planejamento e Políticas Públicas**: ppp, n. 35, p.87-118, 2010.

PARKER, G.; TINOCO-OJANGUREN, C.; MARTÍNEZ-YRÍZAR, A.; MAASS, M. Seasonal balance and vertical pattern of photosynthetically active radiation within canopies of a tropical dry deciduous forest ecosystem in Mexico. **Journal of Tropical Ecology**, v. 21, n. 3, p. 283-295, 2005.

PASTICK, N. J.; JORGENSEN, M. T.; GOETZ, S. J.; JONES, B. M.; WYLIE, B. K.; MINSLEY, B. J. et al. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska. **Global change biology**, v. 25, n. 3, p. 1171-1189, 2019.

PAVÃO, V. M.; NASSARDEN, D. C. S.; PAVÃO, L. L.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Impacto da Conversão da Cobertura Natural em Pastagem e Área Urbana sobre Variáveis Biofísicas no Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 343-351, 2017.

PAVÃO, V. M.; QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; PAVÃO, L. L.; QUERINO, J. K. A. Q.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Temperatura e albedo da superfície por imagens TM Landsat 5 em diferentes usos do solo no Sudoeste da Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015.

PRADO, D. E. Seasonally dry forests of tropical South America: from forgotten ecosystems to a new phytogeographic unit. **Journal of Botany**, v. 57, p. 437-461, 2000.

PEREIRA, A.R; ANGELOCCI, L.R; SENTELHAS, P.C **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas** -Guaíba: Agropecuária, 478 p, 2002.

QGIS Development Team. **Quantum GIS Software**, Version 3.6.2. 2019. Disponível em: <<https://qgis.osgeo.org>>.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 15/11/2019.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **Third ERTS Symposium, Proceedings**, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1973.

RUSSELL, G.; JARVIS, P. G.; MONTEITH, J. L. Absorption of radiation by canopies and stand growth, in **Plant Canopies: Their Growth, Form, and Function** (G. Russell, B. Marshall, and P. G. Jarvis, Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 22-36, 1989.

SANTOS, C. A. C.; WANDERLEY, R. L. N.; ARAÚJO, A. L.; BEZERRA, B. G. Obtenção do saldo de radiação em áreas de pastagem e Floresta na Amazônia (estação seca) através do sensor MODIS. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 420-432, 2014.

SÃO THIAGO, L. E. U.; BARROS, M. A.; BARTH, O. M. Pollen deposition in soil sediments from the middle valley of Paraíba do Sul river (São Paulo and Rio de Janeiro States). **Anuário do Instituto de Geociências**, v.30, p.55- 64, 2007.

SILVA, A. R.; SANTOS, T. S.; QUEIROZ, D. É.; GUSMÃO, M. O.; SILVA, T. G. F. Variações no índice de anomalia de chuva no semiárido. **Journal of environmental analysis and progress**, p. 377-384, 2017.

SILVA, B. B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.1, p.3-8, 2016.

SILVA, B. D.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. D.; MOURA, M. D. Determinação por sensoriamento remoto da

produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2013.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. Large-Scale Spatial Modeling of Crop Coefficient and Biomass Production in Agroecosystems in Southeast Brazil. **Horticulturae**, v. 4, n. 4, p. 44, 2018.

SILVA; D. A. D. O.; LOPES, P. M. O.; MOURA, G. B. D. A.; SILVA, Ê. F. D. F.; SILVA, J. L. B. D.; BEZERRA, A. C. Evolução Espaço-Temporal do Risco de Degradação da Cobertura Vegetal de Petrolina-PE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 1, p. 89-99, 2019.

SILVA, F. H. B. B.; SILVA, M. S. L.; CAVALCANTI, A. C.; CUNHA, T. J. F. **Principais Solos Do Semi-Árido Do Nordeste Do Brasil**: Dia de Campo. Recife: Embrapa, 2005. 35 p.

SOBRINHO, J. E.; PEREIRA, V. C.; OLIVEIRA, A. D.; SANTOS, W. O. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e a radiação global nas condições climáticas de Mossoró-Rn..In: **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari – ES, 2011.**

SOCORRO, A.; CRISTOBAL, R. Fotosíntesis artificial. Comparación con el mecanismo natural. **Revista Cubana de Física**, v. 30, n. 1, p. 9-13, 2013.

SOUZA, J. F. **Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa – PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 130f, 2014.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no Semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, p.41-55, 2015b.

STEFFEN, C. A. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Divisão de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE, São José dos Campos São– SP. Disponível em:< <http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educ/asere/apostila.htm>>. Acesso em setembro de 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TAO, X.; LIANG, S.; HE, T.; JIN, H. Estimation of fraction of absorbed photosynthetically active radiation from multiple satellite data: Model development and validation. **Remote Sensing of Environment**, v.184, p.539–557, 2016.

TEI, F.; SCAIFE, A.; AIKMAN, D. P. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. **Annals of Botany**, v.78, p.633-43, 1996.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, N. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v.362, p.110- 127, 2008.

TSUBO, M.; WALKER, S. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at Bloemfontein, South Africa. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 80, p. 17–25, 2005.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: junho de 2019.

VASCONCELOS, A. D. M.; HENRIQUES, I. G. N.; SOUZA, M. P.; SOUSA SANTOS, W.; SANTOS, W. S.; RAMOS, G. G. Caracterização florística e fitossociológica em área de Caatinga para fins de manejo florestal no município de São Francisco-PI. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 13, n. 4, p. 329-337, 2017.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro (RJ): IBGE, 1991. 124p.

VERÓN, S. R.; BLANCO, L. J.; TEXEIRA, M. A.; IRISARRI, J. G. N.; PARUELO, J. M. Desertification and ecosystem services supply: The case of the Arid Chaco of South America. **Journal of Arid Environments**, v. 159, p. 66-74, 2018.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. rev. ampl. **Viçosa-MG: Ed. UFV**, 2012.

WANG, H.; JIA, G.; FU, C.; FENG, J.; ZHAO, T.; MA, Z. Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 10, p. 2248-2258, 2010.

WANG, H.; PRENTICE, I. C.; DAVIS, T. W. 2014. Biophysical constraints on gross primary production by the terrestrial biosphere. **Biogeosciences**, v. 11, n. 20, p. 5987-6001, 2014.

XIAO, Z.; LIANG, S.; SUN, R.; WANG, J.; JIANG, B. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf area index product. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, p. 105-117, 2015.

XUE, H.; HAN, Y.; LI, Y.; WANG, G.; FENG, L.; FAN, Z. et al. Spatial distribution of light interception by different plant population densities and its relationship with yield. **Field Crops Research**, v. 184, p. 17-27, 2015.