



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS
Programa de Pós-Graduação em Geografia

GABRIEL ALVES VELOSO

**PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA E BIOMASSA EM PASTAGEM
NO BIOMA CERRADO: UMA ANÁLISE A PARTIR DOS
MODELOS SEBAL/CASA E MOD17 NO ESTADO DE GOIÁS**

GOIÂNIA

Maio - 2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

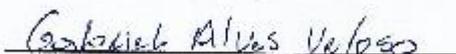
Nome completo do autor: Gabriel Alves Veloso

Título do trabalho: **PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA E BIOMASSA EM PASTAGEM NO BIOMA CERRADO: UMA ANÁLISE A PARTIR DOS MODELOS SEBAL/CASA E MOD17 NO ESTADO DE GOIÁS**

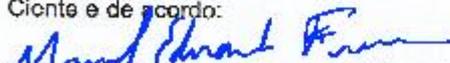
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do autor

Ciente e de acordo:


Assinatura do orientador

Data: 08 / 06 / 2018

GABRIEL ALVES VELOSO

**PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA E BIOMASSA EM PASTAGEM
NO BIOMA CERRADO: UMA ANÁLISE A PARTIR DOS
MODELOS SEBAL/CASA E MOD17 NO ESTADO DE GOIÁS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

GOIÂNIA

Maio – 2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Veloso, Gabriel Alves
PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA E BIOMASSA EM
PASTAGEM NO BIOMA CERRADO: UMA ANÁLISE A PARTIR DOS
MODELOS SEBAL/CASA E MOD17 NO ESTADO DE GOIÁS
[manuscrito] / Gabriel Alves Veloso. - 2018.
149 f.: il.

Orientador: Prof. Manuel Eduardo Ferreira; co-orientador Bernardo
Barbosa da Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de
Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em
Geografia, Goiânia, 2018.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Landsat 8. 2. Biomassa Seca. 3. SEBAL/CASA. 4. MOD17. 5.
Suporte Bovino. I. Ferreira, Manuel Eduardo, orient. II. Título.

CDU 911



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: NATUREZA E PRODUÇÃO DO ESPAÇO

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE JULGAMENTO DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO DE
GABRIEL ALVES VELOSO

Aos 08 dias do mês de maio do ano de dois mil e dezoito (2018), a partir das 14:00h, no Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, teve lugar a sessão de julgamento da Tese de Doutorado de Gabriel Alves Veloso "PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA E BIOMASSA EM PASTAGEM NO BIOMA CERRADO: UMA ANÁLISE A PARTIR DOS MODELOS SEBAL/CASA E MOD17 NO ESTADO DE GOIÁS". A Banca Examinadora foi composta, conforme Portaria n.º 38/2018 da Diretoria do IESA, pelos seguintes Professores Doutores: **Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira** (Presidente), **Profa. Dra. Gislaíne Cristina Luiz** (membro titular interno), **Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Júnior** (membro titular interno), **Prof. Dr. Pedro Rogério Giongo** (membro titular externo) e **Prof. Dr. Pedro Alves Vieira** (membro titular externo). Os examinadores arguiram na ordem citada, tendo o candidato respondido satisfatoriamente. Às 17:40 horas a Banca Examinadora passou a julgamento, em sessão secreta, tendo o candidato obtido os seguintes resultados:

Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira (Presidente) – Ass. Manuel Eduardo Ferreira

Aprovado Reprovado ()

Profa. Dra. Gislaíne Cristina Luiz – Ass. Gislaíne Cristina Luiz

Aprovado Reprovado ()

Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Júnior – Ass. Laerte Guimarães

Aprovado Reprovado ()

Prof. Dr. Pedro Rogério Giongo – Ass. Pedro Rogério Giongo

Aprovado Reprovado ()

Prof. Dr. Pedro Alves Vieira – Ass. Pedro Alves Vieira

Aprovado Reprovado ()

Resultado final: Aprovado Reprovado ()

Houve alteração no Título? Sim () Não

Em caso afirmativo, especifique o novo título: _____

Outras observações: _____

Reaberta a Sessão Pública, a Presidente da Banca Examinadora proclamou o resultado e encerrou a sessão, da qual foi lavrada a presente ata, que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora e pela Secretária do Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Secretaria..... Luana de Castro Amorim

Luana de Castro Amorim
Assistente em Administração

AGRADECIMENTOS

A conclusão desse doutorado é um fechamento de mais um ciclo, no qual foi percorrido um longo caminho, muitas vezes com obstáculos – que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento. Se cheguei até aqui, apenas o fiz pela ajuda, parceria e torcida de muitos amigos, colegas e companheiros de caminhada.

Gostaria de agradecer de forma mais especial, a minha esposa Camilla e ao meu filho Miguel - que nasceu neste período de doutoramento - e minha mãe Ieda. Minha família soube entender minhas ausências, e me deu todo o apoio possível nessa jornada. Agradeço também à minha cunhada Daniele, pelo apoio dado a nossa família em todos os momentos nos quais estive longe de casa.

Agradeço imensamente ao professor Dr. Manuel Eduardo Ferreira, orientador desta pesquisa, pelo incentivo, confiança, amizade e dedicação à realização desta. Suas orientações e contribuições foram (e são!) de grande importância. Meu muito obrigado também ao professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva, coorientador deste trabalho, pela paciência, atenção e importantes contribuições na sua execução.

Agradeço aos professores, Dr. Laerte Guimarães Ferreira Jr; Dr^a. Gislaine Cristina Luiz; Dr. Pedro Rogério Giongo; Dr. Pedro Alves Vieira, pelo aceite em partilhar o momento de culminância deste trabalho, pela leitura dedicada, e pelas preciosas contribuições ao enriquecimento desta pesquisa.

É imprescindível registrar o agradecimento ao Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás, pelo apoio e disponibilização da infraestrutura para a realização desta pesquisa e, em especial, ao professor Dr. Laerte Guimarães Ferreira Jr., pelas grandes contribuições dadas a este trabalho durante todo o seu transcorrer.

A todos os amigos do LAPIG, que contribuíram imensamente na realização deste trabalho, sempre com apontamentos, sugestões e críticas que foram de grande relevância. Agradeço em especial aos colegas (amigos) Érika Gonçalves Pires e Daniel Vallerius, pelas críticas e contribuições importantes na redação da tese, a Janete Silva e Leomar Júnior, pelos dados de campo da Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho e sugestões ofertadas ao trabalho, ao Carlos Roberto e ao Guilherme Arantes, pelo apoio no processamento dos dados. Além disso, gostaria de deixar o meu sincero agradecimento a Fernando Araújo (Brasil), Sérgio Nogueira, Anna Santos, Cleberon Jesus, Adriano Farias, Arielle Arantes, João Costa, Silvio Sousa,

Rodrigo Maranhão, Oscar de Oro, e Gislaine, pela amizade e companheirismo durante todo o período no qual convivemos e partilhamos as alegrias e as angústias deste doutoramento.

Aos demais amigos e colegas que tive a graça de (re)conhecer em Goiânia, como o Ernesto Macaringue, o Eduardo Bata, o Avilmar Rodrigues, o Helcir Ramos e também ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás (IESA/UFG), registro meu cordial agradecimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pelo apoio financeiro para a realização do doutorado mediante a concessão de uma bolsa de estudos, fundamental para o bom andamento deste trabalho.

Por fim, á todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho tornasse realidade, deixo o meu muito obrigado!

Dedico este trabalho ao meu filho Miguel, que nasceu em meio ao turbilhão de experiências vivenciadas neste processo de doutoramento e hoje se traduz como a maior motivação para que eu vá sempre além.

TRAJETÓRIA ACADÊMICA

Minha trajetória formativa cruzou-se com a geografia a partir do meu ingresso no curso de licenciatura desta área na Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES no já distante 2007. A opção pela Geografia acabou sendo uma escolha natural, influenciada pela diversidade de temas e de possibilidades e essencialmente pelas análises e reflexões sobre a relação homem-natureza, que atenderam plenamente meus anseios. Nesse período da graduação, tive a oportunidade de integrar a equipe do Laboratório de Geoprocessamento da UNIMONTES, sob a coordenação do Prof. Dr. Marcos Esdras Leite, onde atuei como monitor por dois anos consecutivos - 2009 e 2010. A experiência adquirida no Laboratório de Geoprocessamento da UNIMONTES foi crucial na minha trajetória acadêmica, pois me propiciou as possibilidades de avançar em meus estudos no âmbito das geotecnologias.

Esta etapa de minha formação encerrou-se em 2011. Na sequência, já no ano seguinte, tive a felicidade de ingressar no mestrado do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), na área de concentração em Ensino, Métodos e Técnicas em Geografia e subárea de Sensoriamento Remoto. A opção por esta instituição deu-se pela reconhecida qualificação de seu Programa de Pós-graduação, em especial na minha área de estudo. Lá, desenvolvi minha pesquisa de mestrado sob a orientação do Prof. Dr. Roberto Rosa e com o suporte financeiro da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Durante este período, tive a oportunidade de cursar a disciplina “Balanço de radiação e energia com dados de sensoriamento remoto” ministrada pelo Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) na cidade de Recife. Essa experiência na UFPE foi de suma importância para a elaboração da minha dissertação. Concluí o mestrado em 2014 com a dissertação intitulada “Análise Espaço-Temporal da Evapotranspiração em Áreas Irrigadas do Projeto Jaíba, Norte de Minas Gerais”.

Nesse mesmo ano, iniciei o processo de doutoramento no Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás (UFG), no Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), na área de concentração Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica, sob a orientação do Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira e coorientação do Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva. Durante a minha trajetória de doutoramento, tive a oportunidade de atuarem diversas atividades do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG), com maior ênfase nas ações voltadas à estimativa dos parâmetros biofísicos em áreas de pastagem com dados de sensoriamento remoto. Assim, neste profícuo período, tive a oportunidade de participar do projeto Radiografia das Pastagens

do Brasil, financiado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE/PR) e pela *Gordon and Betty Moore Foundation*, com temas ligados à pecuária. Atribuo a minha participação junto a este projeto, a opção pela pastagem enquanto objeto principal de análise de minha tese.

Em meu curso de doutorado, também destaco as disciplinas que cursei, tais como: “Ambiente e Ocupação da Região do Cerrado”, “Unidade de Conservação”, “Tópicos Especiais em Sensoriamento Remoto: Física Ambiental” e a “Biogeoquímica e Conservação de Florestas Tropicais no Antropoceno”, sendo esta última cursada na Universidade Estadual do Mato Grosso (UNEMAT), campus Nova Xavantina - MT. Tais disciplinas contribuíram não apenas para a execução desta pesquisa, mas em especial com a minha formação enquanto pesquisador – e isso, por si só, justifica a sua relevância.

Por sua vez, em maio de 2017, iniciei uma nova etapa profissional. Mais do que um simples emprego, o ingresso no cargo de professor na Universidade Federal do Pará (UFPA), campus universitário de Altamira (na área de Geografia Física e Geotecnologias) foi a concretização de um sonho. A atuação docente e o compromisso com o desenvolvimento e aprimoramento do conhecimento científico, motivam-me a sempre buscar e fazer o melhor em minha profissão.

Esta trajetória, cheia de momentos desafiadores e que demandaram muito esforço e dedicação, me trouxe até aqui. Hoje celebro uma etapa de grande importância em minha trajetória – o encerramento do ciclo de doutoramento. Todavia, esta não há de ser a última, pois ainda há um longo caminho a ser percorrido – felizmente!

RESUMO

Estimar parâmetros biofísicos do sistema solo-vegetação, como evapotranspiração real (ETR), saldo de radiação (Rn) e produtividade primária bruta (GPP), assim como informações sobre biomassa seca, é reconhecidamente importante em áreas com atividades agrícolas, especialmente em pastagens (que normalmente não contam com irrigação), podendo auxiliar no adequado manejo desse ambiente. Fazer estas medições por dados satelitários, a partir da radiação eletromagnética refletida pelos alvos na superfície, torna estas operações mais eficientes a uma série de aplicações, como monitoramento de extensas áreas agropastoris. No referido trabalho objetivou-se estimar estes parâmetros, a partir da parametrização de modelos com dados específicos para a pastagem no Cerrado goiano (sobretudo com vistas à produtividade primária bruta), tais como a eficiência de uso da luz (LUE) e a Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FPAR). No intuito de melhorar essas estimativas, utilizou-se de dados meteorológicos locais, como a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), contribuindo para uma melhor compreensão da variabilidade espaço-temporal na área de estudo. O experimento foi realizado em escalas distintas, sendo uma mais detalhada - em áreas de pastagens na Bacia hidrográfica do Rio Vermelho (BHRV), porção oeste de Goiás, com a utilização das imagens do satélite Landsat 8 sensor OLI/TIRS, e outra mais abrangente, para as áreas de pastagens no Cerrado de todo o estado goiano, a partir da utilização de imagens NDVI geradas pelo sensor MODIS - produto MOD13Q1H. Na BHRV, analisou-se a variação destes parâmetros no período de outubro de 2014 a setembro de 2015, sendo utilizadas nove imagens Landsat 8, órbita/ponto 223/71. A estimativa destes parâmetros, sobretudo a GPP, foi obtida através do acoplamento dos algoritmos SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), voltado para a estimativa da evapotranspiração, combinado ao modelo CASA (*Carnegie Ames Stanford Approach*), que calcula a Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (APAR) e que, juntamente com dados de superfície, finaliza com a estimativa da biomassa seca. Para essa mesma área, foi realizada também uma adaptação da metodologia do produto GPP obtido pelo MOD17A2H para imagens do Landsat 8, no intuito de melhor compreender a variação da GPP e da biomassa seca em imagens de média resolução espacial (30 m), com a calibração do modelo com dados específicos para a pastagem e dados meteorológicos locais. Dentre os resultados, na BHRV os valores de Rn e ETR foram condizentes com os encontrados na literatura, apresentando significativa variabilidade espacial e temporal, sendo que o primeiro apresentou variação média no período estudado de 413 w/m^2 a 670 w/m^2 , e o segundo de $1,69 \text{ mm.dia}^{-1}$ a $4,55 \text{ mm.dia}^{-1}$, no qual os menores valores podem ser relacionados à áreas de pastagem com algum nível de degradação. Em relação à GPP, o método SEBAL/CASA demonstrou ser mais eficiente dentre os métodos aplicados nesta pesquisa, acompanhando bem a sazonalidade climática da região e suas influências nas áreas de pastagem, ao apresentar uma variação de $0,10$ a $4,6 \text{ g C m}^{-2}$, e com um potencial médio de sequestro de carbono de $4,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O método do MOD17, adaptado às imagens do Landsat 8, apresentou variação de $0,5$ a $4,0 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com pouca variação no acompanhamento da sazonalidade climática da região. Já a análise da GPP pelo produto MOD17A2H na BHRV, esta apresentou variação de $0,27$ a $5,39 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, porém com baixa variação espacial, devido à baixa resolução da imagem e dados de calibração do modelo (gerada para o globo terrestre). A análise da biomassa seca seguiu esse mesmo padrão, sendo o método SEBAL/CASA mais eficiente, obtendo-se bons resultados com os dados observados em campo, com um coeficiente de correlação de $0,663$, erro absoluto médio de $0,228$, raiz do erro quadrático médio de $0,665$ e índice de concordância de Willmott de $0,754$. Já a biomassa seca estimada com o produto MOD17A2H apresentou boa correlação ($r = 0,833$) com os dados de campo, quando levada em consideração a variação temporal; no entanto, para esta (biomassa seca) observou-se erro

médio absoluto e erro médio quadrático (2,133) significativamente elevado, devido à superestimativa observada. Em relação à Unidade Animal por área (UA/hectare), os dados obtidos pelo método SEBAL/CASA e MOD17 aplicados às imagens Landsat 8 demonstraram ser mais próximos da realidade da BHRV, com valores médios de UA/ha de 1,5 e 2,5 UA/ha, respectivamente. Já os dados de UA/ha obtidos com imagens MOD17A2H, estes aparentam ser elevados para a bacia, com valor médio de 3,6 UA/ha na BHRV. Ademais, os dados de GPP e biomassa seca obtidos nas áreas de pastagens do cerrado goiano, a partir de imagens de NDVI (produto MOD13Q1H), apresentaram ser significativamente mais baixos que os observados pelo produto de GPP MOD17A2H, refletindo esse resultado na estimativa da UA/ha no estado de Goiás, que, com o produto MOD17A2H, foi observado valores médios de 5,2 UA/ha para as áreas de pastagens do Estado de Goiás. Já os dados obtidos por esta pesquisa, estes apresentaram valores médios de UA/ha de 2,5, sendo este mais próximo da realidade em tais áreas de pastagem no cerrado goiano. Portanto, a estimativa destes parâmetros, visando uma leitura da pastagem e dados climáticos locais, apresentou melhores resultados com a calibração dos modelos com dados específicos.

Palavras-Chave: Landsat 8; Biomassa Seca; SEBAL/CASA; MOD17A2H; Suporte bovino.

ABSTRACT

Biophysical parameters of the soil-vegetation system, such as real evapotranspiration (ETR), radiation balance (Rn) and gross primary productivity (GPP), as well as information on dry biomass, are recognized as important in areas with agricultural activities, especially pastures (that usually do not have irrigation), and can help in the proper management of this environment. Making these measurements by satellite data, from the electromagnetic radiation reflected by the targets on the surface, makes these operations more efficient in a series of applications, such as monitoring of extensive agropastoral areas. The objective of this study was to estimate these parameters, based on the parameterization of models with specific data for pasture in the Cerrado of Goiás (mainly with regard to gross primary productivity), such as light use efficiency (LUE) and Photosynthetically Active Absorbed Radiation (FPAR). In order to improve these estimates, local meteorological data, such as Photosynthetically Active Radiation (PAR), were used, contributing to a better understanding of the spatial-temporal variability in the study area. The experiment was carried out at distinct scales, one of which was more detailed - in pasture areas in the Rio Vermelho watershed (BHRV), west portion of Goiás, using Landsat 8 OLI/TIRS imagery, and a more comprehensive one, for pasture areas in the Cerrado of the entire state of Goiás, using the NDVI images generated by the MODIS sensor - product MOD13Q1H. At BHRV, the variation of these parameters was analyzed from October 2014 to September 2015, using nine Landsat 8 images, path/roll 223/71. The estimation of these parameters, especially the GPP, was obtained through the coupling of the algorithms SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), aimed at the estimation of the evapotranspiration, combined with the CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) model, which calculates the Photosynthetically Active Radiation Absorbed (APAR) and, together with surface data, ends with the estimate of dry biomass. For this same area, an adaptation of the methodology of the GPP product obtained by MOD17A2H to Landsat 8 images was also carried out, in order to better understand the variation of GPP and dry biomass in medium spatial resolution images (30 m), with calibration of the model with specific pasture data and local meteorological data. Among the results, in the BHRV the values of Rn and ETR were consistent with those found in the literature, presenting significant spatial and temporal variability, with the first presenting a mean variation from 413 to 670 w/m^2 , and the second from 1.6 to 4.55 mm.day^{-1} , in which the lowest values can be related to pasture areas with some level of degradation. In relation to GPP, the SEBAL/CASA method proved to be more efficient among the methods applied in this research, following the climatic seasonality of the region and its influences on pasture areas, presenting a variation of 0.10 to 4.6 g C m^{-2} , and with an average carbon sequestration potential of 4.8 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. The MOD17 method, adapted to Landsat 8 images, showed a variation of 0.5 to 4.0 $\text{g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, with small variation in the monitoring of climatic seasonality of the region. The analysis of GPP, by the product MOD17A2H in the BHRV, presented a variation of 0.27 to 5.39 $\text{g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, but with low spatial variation due to low image resolution and calibration data of the model (generated for the terrestrial globe). The analysis of the dry biomass followed the same pattern, with the SEBAL/CASA method being more efficient, obtaining good results with the data observed in the field, with a correlation coefficient of 0.663, mean absolute error of 0.228, root mean square error of 0.665 and Willmott's concordance index of 0.754. The dry biomass estimated with the product MOD17A2H showed good correlation ($r = 0.833$) with the field data, when considering the temporal variation; however, for this (dry biomass), mean absolute error and mean square error (2,133) were observed, due to the observed super-optimization. In relation to the Animal

Unit by area (UA/hectare), the data obtained by the SEBAL/CASA and MOD17 method applied to the Landsat 8 images showed to be closer to the reality of the BHRV, with average values of UA/ha of 1,5 and 2,5 UA/ha, respectively. The UA/ha data obtained with MOD17A2H images appear to be high for the basin, with an average value of 3.6 UA/ha in the BHRV. In addition, data from GPP and dry biomass obtained in the pasture areas of the Cerrado goiano, from NDVI images (product MOD13Q1H), were significantly lower than those observed by the GPP product MOD17A2H, reflecting this result in the UA estimate/ha in the State of Goiás, which, with the product MOD17A2H, average values of 5.2 UA/ha were observed for the pasture areas of the State of Goiás, while the data obtained by this research presented average values of UA/ha of 2.5, which is closer to reality in such pasture areas in the Cerrado of Goiás. Therefore, the estimation of these parameters, aiming at a reading of the pasture and local climatic data, presented better results with the calibration of the models with specific data.

Key words: Landsat 8; dry biomass; SEBAL/CASA; MOD17A2H; Suporte bovino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Curva de Keeling, indicando o crescimento da concentração do CO ₂ na atmosfera.	29
Figura 02 – Emissões dos GEEs no Brasil, em gigatoneladas, por setores da economia.....	31
Figura 03 – Produtos utilizados para geração da FPAR/IAF (MOD15).	40
Figura 04 – Gráfico da função linear entre os fatores de atenuação da eficiência do uso da luz, Tescalar e DPVescalar.....	41
Figura 05 – Uso e Ocupação do Solo no Estado de Goiás	46
Figura 06 – Mapa de localização da área de estudo, BHRV	49
Figura 07 – Localização da BHRV no estado de Goiás e das cinco propriedades rurais visitadas nas doze campanhas de campo (outubro de 2014 a setembro de 2015).....	53
Figura 08 – Paisagem típica nas 5 propriedades na BHRV selecionadas neste estudo.....	53
Figura 09 - Etapas do procedimento de coleta dos dados em campo, com os referidos instrumentos.	55
Figura 10 – Etapas do procedimento de secagem e pesagem das amostras de biomassa verde e seca.	55
Figura 11 – Exemplos de voos com VANT realizados nas Fazendas Jatobá e N. Sra. Das Graças em janeiro, em janeiro e julho de 2015.	56
Figura 12 – Média da altura da pastagem na BHRV, para os períodos chuvoso e seco.	57
Figura 13 – Média das assinaturas espectrais das pastagens para os períodos seco e chuvoso	60
Figura 14 – (a) Imagem OLI/TIRS do satélite Landsat 8 sobreposta pelo limite vetorial da bacia hidrográfica do rio Vermelho, na composição 6R 5G 4B; (b) fluxograma do algoritmo SEBAL acoplado ao CASA.....	62
Figura 15 – Correlação entre o NDVI e o FPAR para o período chuvoso em áreas de pastagem no Estado de Goiás.	64
Figura 16 – Correlação entre o NDVI e o FPAR para o período de estiagem em áreas de pastagem no Estado de Goiás.	65
Figura 17 – Tile MODIS para o Bioma Cerrado	67
Figura 18 – Localização das Estações Meteorológicas no Bioma Cerrado.....	69

Figura 19 – Fluxograma da adaptação da metodologia MOD17A2H para Imagens do produto MOD13Q1H.	70
Figura 20 – Saldo de radiação nas áreas de pastagens da BHRV.	76
Figura 21 – Mapa de Evapotranspiração Real - ETR diária nas áreas de pastagens na BHRV.	80
Figura 22 – Regime pluviométrico da área BHRV, entre outubro de 2014 a setembro de 2015.	81
Figura 23 – Distribuição do Rn em área de pastagem na BHRV, em função dos componentes do balanço de energia, ao longo de todo o período desta pesquisa.	85
Figura 24 – Eficiência do uso da Luz, por meio do método MOD17 (L8) e CASA-SEBAL..	87
Figura 25 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em g C m ⁻² dia ⁻¹ , por meio do modelo SEBAL/CASA para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.	89
Figura 26 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em g C m ⁻² dia ⁻¹ , por meio do modelo SEBAL/CASA para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jun/2015.	90
Figura 27 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em g C m ⁻² dia ⁻¹ , por meio do modelo SEBAL/CASA para os dias 17/jul/2015, 18/ago/2015 e 03/set/2015.	91
Figura 28 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em g C m ⁻² dia ⁻¹ , por meio do modelo MOD17 (L8) para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.	92
Figura 29 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em g C m ⁻² dia ⁻¹ , por meio do modelo MOD17 (L8) para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jun/2015.	93
Figura 30 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em g C m ⁻² dia ⁻¹ , por meio do modelo MOD17 (L8) para os dias 17/jul/2015, 18/ago/2015 e 03/set/2015.	94
Figura 31 – Modelos de Regressão para Simulação da Variabilidade da GPP ao longo do ano em áreas de pastagens na BHRV, pelos métodos MOD17 (L8) e SEBAL/CASA.	98
Figura 32 – Gráficos dos valores de mediana dos métodos SEBAL/CASA, MOD17 (L8) e Produto MOD17A2H.	100
Figura 33 – Sequestro de C em áreas de pastagens na BHRV.	105
Figura 34 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia ⁻¹ método SEBAL/CASA para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.	107
Figura 35 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia ⁻¹ método SEBAL/CASA para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jul/2015.	108
Figura 36 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia ⁻¹ método SEBAL/CASA para os dias 17/jul/2015, 18/ago/2015 e 03/set/2015.	109

Figura 37 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia ⁻¹ , pelo método MOD17 (L8) para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.	110
Figura 38 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia ⁻¹ , pelo método MOD17 (L8) para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jun/2015.	111
Figura 39 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia ⁻¹ , pelo método MOD17 (L8) para os dias 17/jul/2014, 18/ago/2015 e 03/set/2015.	112
Figura 40 – Dados de biomassa seca estimados com imagens de satélite e em campo.	114
Figura 41 – Unidade Animal para as pastagens na BHRV, avaliadas no período dessa pesquisa.	117
Figura 42 – Correlação entre MOD17A2H e GPP NDVI.	120
Figura 43 – Biomassa Seca em áreas de pastagens do Estado de Goiás – Ano 2014.	121
Figura 44 – Produção média mensal das pastagens no Estado de Goiás e precipitação mensal.	122
Figura 45 – Unidade Animal para o Estado de Goiás – Ano 2014, observada por dois modelos, sendo o mapa da direita baseado em modelo gerado nesta pesquisa.	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Parâmetros de calibração do modelo específicos para cada tipo de uso e ocupação do solo.	42
Tabela 02 – Características dos sensores OLI e TIS do satélite Landsat-8.	44
Tabela 03 – Datas da passagem do satélite e datas da coleta das amostras de pastagem.	61
Tabela 04 – Data das imagens do Landsat 8 OLI/TIRS (Data), Hora local (Hora), ângulo de elevação do sol (E), cosseno do ângulo zenital Z, quadrado da distância terra-sol e seu valor médio (d_r), Transmitância atmosférica (T_{sw}).	73
Tabela 05 – Valores estatísticos das cartas do saldo de radiação (W/m^2) nas áreas de pastagem na BHRV, para os dias estudados.	74
Tabela 06 – Dados da estação meteorológica e dados complementares do SEBAL, incluindo Temperatura do ar (T) máxima e mínima diárias ($^{\circ}C$), Umidade relativa (UR) máxima e mínima (%), velocidade média do vento ($vv\ m\ s^{-1}$) a 2 metros, pressão atmosférica média diária (p_o , kPa), radiação solar global diária (R_{s24} , $MJ\ m^{-2}$).	78
Tabela 07 – Parâmetro estatístico dos valores de Evapotranspiração real (mm.dia-1) em áreas de pastagem na BHRV.	82
Tabela 08 – Datas das imagens Landsat 8 OLI/TIRS, T_1 e T_2 , referentes aos dias selecionados para a pesquisa, TMIN_Scalar, VDP_Scalar, Radiação fotossinteticamente ativa diária – PAR ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$).	87
Tabela 09 – Índices de correlação de Pearson, erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e índice de concordância de Willmott (d), aplicados aos dados de produtividade primária bruta nos métodos SEBAL/CASA e MOD17 (L8).	99
Tabela 10 – Índices de correlação de Pearson, erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e índice de concordância de Willmott (d) para áreas de pastagem da BHRV.	115
Tabela 11 – Taxa de lotação animais ou unidade animal por hectare na BHRV para o ano de 2015.	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Agricultura de Baixo Carbono
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CASA	Carnegie Ames Stanford Approach
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETR	Evapotranspiração Real
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FPAR	Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (ou Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa)
GEE	Gases do Efeito Estufa
GMAO	Global Modeling and Assimilation Office
GPP	Produtividade Primária Bruta do inglês Gross Primary Production
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IDP	Inverso da Potência da Distância (ou <i>Inverse Distance To a Power</i>)
LAPIG	Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento
LE	Fluxo de Calor Latente
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multispectral Scanner System
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)
NPP	Produtividade Primária Líquida do inglês Net Primary Production
OLI	Operational Land Imager
REDD	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SEPLAN	Secretaria do Planejamento e Desenvolvimento do Estado de Goiás
SR	Sensoriamento Remoto
TIRS	Thermal Infrared Ssensor
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey (ou Serviço Geológico dos Estados Unidos)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	22
Hipóteses da Pesquisa.....	25
Objetivo Geral	25
Objetivos Específicos	25
Organização da Tese.....	26
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 – A Radiação Solar, Sequestro de Carbono e Emissões de Gases de Efeito Estufa.....	27
2.2 – Pastagens Cultivadas	32
2.3 – Produtividade Primária Bruta (GPP)	34
2.4 – Estimativa da Produtividade Primária Bruta com Dados Satelitários	36
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 – Caracterização da Área de Estudo	46
3.1.1 – Estado de Goiás	46
3.1.2 – Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho	47
3.2 – Procedimentos Metodológicos	51
3.2.1 – Base de Dados Cartográficas	52
3.2.2 – Áreas de Estudo Específicas (Propriedades Rurais).....	52
3.2.3 – Instrumentos de Campo	54
3.2.4 – Procedimentos de Campo e Laboratoriais	54
3.2.5 – Análise de Laboratório e Caracterização Radiométrica das Pastagens na BHRV	55
3.2.6 – Processamento Digital das Imagens Landsat 8 OLI/TIRS (SEBAL/CASA)	60
3.3 – Processamento das Imagens MODIS - Produto GPP Pastagem no Cerrado Goiano	67
3.2.5 – Análises Estatísticas e Validação	70
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1. – GPP Estimada com Modelo SEBAL/CASA (L8) e MOD17 (L8) para a BHRV	72
4.1.1 – Alguns Parâmetros de Calibração.....	72
4.2 – Saldo de Radiação em Áreas de Pastagens na BHRV	73
4.3 – Componentes do Balanço de Radiação, Energia e Evapotranspiração Real em Áreas de Pastagem na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho	77
4.4 – Carbono Fixado pela Pastagem na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho	85
4.5 – Estimativa da Biomassa em Áreas de Pastagens na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho	105
4.6 – Estimativa da GPP e Biomassa Seca em Áreas de Pastagens no Estado de Goiás	118
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

APÊNDICE I.....	139
APÊNDICE II.....	150

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos 10 anos, a temática relacionada às mudanças climáticas tem sido amplamente debatida por grandes centros científicos e pela imprensa, em várias partes do mundo. Os gases do efeito estufa (GEE), por exemplo, resultantes de atividades antropogênicas, vêm sendo apontados como os principais responsáveis pelas alterações climáticas, com destaque para o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Embora não haja unanimidade, tais emissões são tidas como a causa da intensificação da temperatura média global, fato que tem mobilizado chefes de Estado e cientistas no desenvolvimento de políticas públicas e tecnológicas para a mitigação das emissões e armazenamento do carbono atmosférico (SILVA *et al.*, 2013).

Uma das alternativas para a redução das emissões de CO₂ é o controle e incremento da produtividade primária bruta (GPP do inglês *Gross Primary Productivity*) de sistemas naturais e antrópicos, por meio da recuperação de áreas degradadas (SILVA *et al.*, 2013). Este parâmetro é considerado uma propriedade fundamental, por representar o sequestro do carbono atmosférico, ao convertê-lo em matéria orgânica através do processo de fotossíntese, armazenando-o na vegetação e no solo. Portanto, a GPP pode ser definida como a taxa com que o CO₂ presente na atmosfera é convertido pelo processo fotossintético em substância orgânica (ARAGÃO, 2004).

Nesse contexto, o Brasil apresenta posição de destaque no cenário mundial, por seu potencial em sequestrar carbono da atmosfera, com maior relevância para a floresta Amazônica e, mais ultimamente, no Cerrado. O país também se destaca pelo aumento contínuo nas emissões de GEE, sobretudo nas últimas décadas, em decorrência dos desmatamentos e mudanças no uso do solo, em geral caracterizadas pela expansão e intensificação da agricultura e pastagem em áreas do Cerrado (ROSA e SANO, 2013).

Dessa forma, o Governo Federal vem desenvolvendo mecanismos que possam mitigar as emissões de GEE, especialmente a partir de 2010 com a criação do plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), elaborado de acordo com o artigo 3º do Decreto Federal nº 7.390/2010, e que tem por finalidade a organização e o planejamento das ações a serem realizadas para a adoção das tecnologias sustentáveis de produção. O Plano ABC, desenvolvido para o setor do agronegócio, tem como objetivo disponibilizar crédito aos produtores rurais para a adoção de tecnologias de redução/mitigação das emissões de GEE.

Uma das principais metas estabelecidas neste programa é a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e a implantação de 4 milhões de hectares destinados à

integração lavoura-pecuária-floresta (CNA, 2014). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2009), a recuperação de pastagens degradadas tem sido citada como uma das mais importantes políticas agrícolas para a mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, o aumento da GPP em áreas de pastagens pode contribuir significativamente no sequestro do carbono atmosférico, além de ampliar a produção sem a necessidade de expansão da fronteira agrícola (DIAS-FILHO, 2011). Essas medidas são importantes devido à crescente demanda por alimentos, estimada em 2050 como duas vezes maior do que nos dias atuais (FAO, 2009). O grande desafio é produzir mais, sem provocar danos ao meio ambiente.

Torna-se, deste modo, de significativa importância conhecer o real potencial das áreas de pastagens no Brasil (maior produtor de carne bovina no mundo), de forma a ampliar o sequestro de carbono (e de outros gases, como o metano e óxido nitroso), bem como suprir a demanda por proteína animal. Somente assim será possível a adoção de ações estratégicas de planejamento e medidas preventivas e/ou corretivas em termos ambientais.

Neste contexto, o sensoriamento remoto (SR) apresenta-se como ferramenta essencial no monitoramento do uso do solo, podendo ser utilizado para identificar alterações em distintas áreas da superfície terrestre. Outra vantagem do SR são as múltiplas resoluções espacial e temporal dos diferentes sensores a bordo de satélites, o que possibilita um melhor entendimento dos diversos fenômenos biofísicos, resultantes da interação da radiação solar sobre os vários tipos de cobertura do solo; tais medidas, o que dificilmente pode ser obtido por métodos tradicionais (embora de grande importância), pois se restringem à áreas de pequena dimensão espacial, como é o caso das torres micrometeorológicas e outros métodos clássicos.

Para tanto, foram desenvolvidos métodos que utilizam imagens de SR na determinação da GPP e com alguns dados meteorológicos complementares de superfície. Uma das metodologias de destaque é a que resultou no produto MOD17A2H (baseada em dados do sensor orbital MODIS), que disponibiliza dados de produtividade primária bruta para diversos ecossistemas terrestres, com resolução espacial de 1 km (para o MOD17A2, coleção 5) e de 500 metros (para o MOD17A2, coleção 6), sendo os mesmos gerados para um período de 8 dias com base em dados de SR e dados meteorológicos de re-análise. Outra metodologia semelhante foi desenvolvida por Bastiaanssen e Ali (2003), que adaptaram a metodologia de estimativa dos balanços de radiação e energia, provenientes do algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land*– SEBAL, acoplando o modelo de produção de biomassa e o modelo de eficiência do uso da luz, e originando o algoritmo *Carnegie Ames Stanford*

Approach – CASA, baseado na perspectiva do uso do sensoriamento remoto como entrada de dados (parâmetros) para a análise global da produtividade primária bruta.

Vários sensores orbitais têm sido utilizados na determinação da produtividade primária bruta, entre eles o *Enhanced Thematic Mapper Plus – ETM+* (Landsat 7), o *Thematic Mapper- TM*(Landsat 5), os sensores *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS* (plataforma Terra e Aqua), *AVHRR* (plataforma NOAA) e, mais recentemente, os sensores *Operation Land Imager - OLI* e *Thermal Infrared Sensor – TIRS* (Landsat 8) .A estimativa desses parâmetros biofísicos, com a GPP, em sensores de melhor resolução espacial torna-se um desafio absolutamente necessário, devido à grande variabilidade das áreas de pastagens, bem como o uso intenso e dinâmico que ocorre em áreas do cerrado. No caso, a aplicação dessas metodologias em imagens de resolução espacial médio-alta, como as sensor Landsat 8 OLI/TIRS, pode trazer a compreensão desses parâmetros numa escala regional ou até mesmo local (em nível de propriedades rurais), podendo auxiliar na gestão e planejamento dessas áreas no intuito de torná-las mais produtivas e ambientalmente sustentáveis.

Com base no exposto, esta pesquisa e volta para a elaboração de uma estratégia na quantificação da Produtividade Primária Bruta (GPP) em escala regional, especialmente em áreas de pastagens no bioma Cerrado do estado de Goiás, a partir de um aperfeiçoamento na acurácia espacial e nas modelagens ambientais, respondendo aos seguintes questionamentos:

- a) A estimativa da GPP pode apresentar melhor acurácia com o emprego de dados específicos para a pastagem e dados climáticos locais?
- b) Qual é a variabilidade espacial e temporal da GPP em áreas de pastagens no Cerrado goiano?
- c) Como a sazonalidade climática influencia o sequestro de carbono nessas pastagens?
- d) Qual o seu potencial de sequestro de carbono e variabilidade espacial na produção de biomassa seca?
- e) Com base nas questões acima, quais as possíveis orientações quanto ao uso e/ou recuperação das pastagens no bioma Cerrado?

Portanto, a relevância deste estudo está na geração de novas informações sobre a GPP em áreas de pastagem, de forma mais dinâmica e com maior precisão espacial (i.e., maior detalhamento), a partir da utilização de dados de sensoriamento remoto e dados climáticos locais de superfície. Assim, os resultados obtidos nesta pesquisa contribuirão para:

1) Subsidiar decisões referentes às ações de manejo em áreas de pastagens, com o objetivo de melhorar a eficiência da cadeia produtiva, ao aumentar a produção sem a necessidade de expandir a fronteira agrícola.

2) Gerar dados espaciais e temporais mais detalhados para a GPP, auxiliando na compreensão do sequestro de carbono em tais áreas, e favorecendo assim o acompanhamento das áreas favorecidas por planos de redução de emissões de gases de efeito estufa.

3) Subsidiar pesquisas em escala local e regional, que necessitem de informações sobre a distribuição espacial da GPP em áreas de pastagem.

Hipóteses da Pesquisa

(H1) A estimativa da GPP em áreas de pastagem, via dados de satélites, apresenta melhor acurácia com modelos calibrados com parâmetros específicos da eficiência energética e utilização de dados climáticos locais, bem como mapas de uso e cobertura do solo mais refinados.

(H2) O comportamento sazonal das variáveis climáticas, conjuntamente ao tipo de manejo, influencia nos padrões espaço-temporais da GPP em áreas de pastagem.

Objetivos da Pesquisa

Objetivo Geral

- Estimar a produtividade primária bruta em áreas de pastagem no cerrado goiano, a partir de produtos satelitários (sensores OLI/IRTS - Landsat 8 e MODIS - Terra), utilizando parâmetros biofísicos específicos da espécie *Brachiaria Brizanta* e dados climáticos locais.

Objetivos Específicos

- Adaptar a metodologia do MOD17A2H para a estimativa da GPP com parâmetros específicos da pastagem;
- Avaliar os dados de GPP gerados pelos sensores MODIS (plataforma Terra), produto MOD17A2H, e OLI/TIRS (plataforma Landsat 8), na geração de variáveis biofísicas da pastagem;
- Analisar os parâmetros biofísicos da pastagem em distintas escalas de mapeamento;

- Analisar as variáveis biofísicas necessárias à execução dos modelos propostos (saldo de radiação e evapotranspiração);
- Avaliar a exatidão dos dados adquiridos por sensoriamento remoto, através da comparação com dados coletados em campo;

Organização da Tese

A tese está organizada em cinco capítulos; (Capítulo 1) Introdução, com a contextualização, justificativa, questões científicas, hipóteses e objetivos da tese. (Capítulo 2) Fundamentação teórica, com conceitos básicos, a pesquisa, relacionando a dinâmica global do carbono e sua influência na questão das mudanças climáticas, questões relacionadas à pastagem, além de metodologias de estimativa da GPP com dados satelitários. (Capítulo 3) Materiais e Métodos, com a caracterização das áreas de estudo, destacando aspectos como clima, solo e vegetação, bem como os procedimentos metodológicos utilizados em todas as etapas da pesquisa. (Capítulo 4) Resultados e Discussões, onde são apresentados e discutidos os resultados desta pesquisa, conforme questões, objetivos e hipóteses apresentadas. (Capítulo 5) Por fim, apresentam-se as considerações finais, fechando a tese.

CAPÍTULO 2– FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – A Radiação Solar, Sequestro de Carbono e Emissões de Gases de Efeito Estufa

A radiação solar (R_g) é a principal fonte de energia para os processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem na superfície da Terra. O conhecimento da interação da R_g com as camadas da atmosfera e os alvos da superfície terrestre é de grande relevância para o desenvolvimento de modelos de gerenciamento de recursos naturais, pois se trata do maior responsável pelas trocas de calor e massa na troposfera, materializado pela evapotranspiração no sistema solo-planta-atmosfera, bem como pelo processo de fotossíntese.

Esta interação com o planeta Terra também provoca um dos fenômenos essenciais para o desenvolvimento da vida, denominado efeito estufa. Este ocorre quando a R_g , que atinge a superfície terrestre na forma de ondas curtas (0,3 a 0,4 μ m), passa pela atmosfera, interage com seus constituintes (nuvem, vapor d'água, aerossóis, entre outros), sendo parte dessa radiação absorvida, parte refletida de volta para o espaço e parte é transmitida (EMBRAPA, 2015). Portanto, existem processos predominantes que controlam o fluxo de entrada e saída da energia no planeta Terra, sendo esta atenuação resultante do espalhamento e da absorção provocados pelos gases e aerossóis, além da reflexão e absorção que ocorrem à superfície. O processo de reflexão ou albedo pode ser definido pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o incidente, dependente das características de uso e ocupação da superfície (tais como, tipo de vegetação, nível de exposição do solo, presença de água, etc.), ângulo zenital solar, condições de umidade do ar e superfície, umidade e tipo de solo, além de interferência das nuvens (tipos, espessura e profundidade óptica, por exemplo) (VELOSO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2005).

A radiação absorvida provoca o aquecimento dos corpos, que, por sua vez, emite radiação na forma de calor, em comprimentos de ondas do infravermelho, também classificada como radiação de ondas longas (5,0 a 100,0 μ m). Este calor é bloqueado por contingentes químicos gasosos presentes na atmosfera e, dessa forma, intensificando a retenção do calor nas camadas mais baixas da atmosfera. Este fenômeno natural é importante para a manutenção da temperatura média do planeta, possibilitando o desenvolvimento devida na troposfera.

No entanto, as atividades humanas têm causado diversas alterações ambientais na superfície terrestre. Como consequência, questões relacionadas às mudanças climáticas têm sido amplamente debatidas pela mídia e centros científicos de estudos avançados em várias partes do mundo. Os gases de efeito estufa (GEE), por exemplo, resultantes de atividades

antropogênicas, vêm sendo apontados como um dos principais responsáveis pelas mudanças no clima, materializados em grande parte pela queima de combustíveis fósseis, queimadas e mudanças no uso da terra, as duas últimas principalmente em países emergentes (ARAGÃO 2004; SILVA *et al.*, 2013). A intensificação dos GEE na atmosfera é preocupante, devido a uma correlação positiva com a temperatura global média da superfície terrestre, como foi demonstrado por Keeling e colaboradores (WOODWELL *et al.*, 1998).

Os principais gases da atmosfera terrestre que contribuem para o efeito estufa são o vapor d'água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Esses gases exercem importantes trocas energéticas, sendo o vapor d'água o mais importante agente do efeito estufa. Suas concentrações atmosféricas provêm unicamente de fontes naturais, como a evaporação, transpiração e atividades vulcânicas (IPCC, 1990). Os gases de ações antropogênicas que intensificam o efeito estufa são demonstrados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*, em inglês), que descreve em seu relatório de 2007 o aumento da concentração deste em séries históricas jamais registradas antes do século XIX.

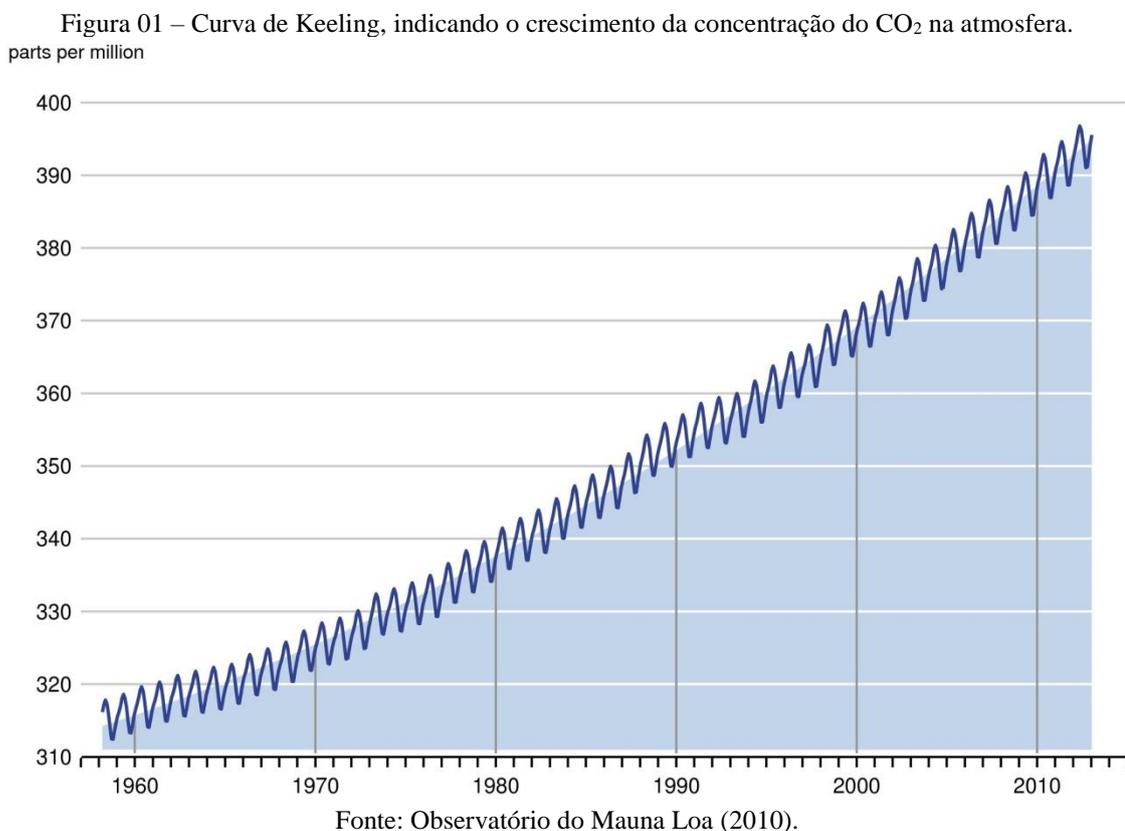
As emissões de CH₄ resultam de diversas atividades, como aterros sanitários, tratamento de esgoto, sistema de produção e processamento de petróleo e gás natural, atividades agropecuárias, mineração de carvão, queima de combustíveis fósseis, conversão de floresta natural para outros usos. No Brasil, o principal setor de emissões de CH₄ é o agropecuário, decorrente da fermentação entérica do rebanho de ruminantes, principalmente do rebanho bovino (SEEG, 2017). Segundo dados do IPCC (2007), a concentração de CH₄ na atmosfera apresentou aumento de 715 ppm em 1750 para 1732 ppm no início da década de 1990, e já registrava 1774 ppm em 2005, o que corresponde a um aumento de 148%.

As emissões de NO₂ resultam principalmente da indústria de fertilizantes químicos, queimadas e uso de combustíveis fósseis, tendo apresentado um aumento de 270 ppm em 1750 para 319 ppm em 2005, o que corresponde a um aumento de 18,15% (IPCC, 2007).

Dentre esses gases, o dióxido de carbono deve ser encarado como um dos principais responsáveis por esse processo. O CO₂ tem sua importância não só associada ao efeito estufa, mas ao processo de fotossíntese, de forma que sua concentração tem aumentado progressivamente nos últimos anos. A concentração atmosférica global do CO₂ aumentou de 280 ppm em 1750 para aproximadamente 400 ppm em 2010, o que corresponde a um aumento de 42,85% (IPCC, 2007). Essa tendência de aumento da concentração de CO₂ na atmosfera pode ser atribuída principalmente às atividades humanas, como o uso de

combustíveis fósseis, a industrialização, mudança no uso da terra e a agricultura (JÚNIOR *et al.*, 2013). A Figura 1 mostra a evolução das concentrações atmosféricas de CO₂ ao longo das últimas décadas.

Neste contexto, os gases do efeito estufa (GEE), resultantes de atividades humanas, em especial o CO₂, tem sido apontados como um dos principais responsáveis pelo aumento da temperatura média global. Vários centros de pesquisas internacionais têm alertado e recorrido aos líderes mundiais e chefes de Estado para que sejam desenvolvidas ações que promovam a redução das emissões dos GEE, ao mesmo tempo incentivando o desenvolvimento de tecnologias de extração e armazenamento do carbono atmosférico (SILVA *et al.*, 2013).



Desde a publicação do IV Relatório de Avaliação do IPCC, onde se apontou com certeza científica maior que 90% que as alterações climáticas no planeta são de responsabilidade das atividades humanas (IPCC 2007), as medidas para a redução das emissões passaram a ser debatidas no âmbito internacional.

Nesse contexto, o Brasil apresenta uma posição de destaque no cenário mundial, por seu potencial em armazenar carbono da atmosfera em seus sistemas florestais, com maior relevância na floresta Amazônica e no Cerrado (devido à grande extensão desses ambientes

no território nacional), bem como seu potencial de redução em diversos setores, sobretudo no agropecuário. O país, além de abrigar a maior área de floresta tropical do mundo, também se posiciona entre os maiores emissores de GEE no mundo, estando atrás somente da China, EUA e União Européia (LEITE e FERREIRA, 2012). As emissões brasileiras de GEE se diferenciam dos demais grandes emissores (onde a queima de combustível fóssil é o principal vilão), sendo que aqui as mudanças no uso do solo, com destaque ao desmatamento, e a intensificação da agricultura como as principais causas (SEEG, 2017; MAPBIOMAS, 2017).

Como resultado, a publicação do IV Relatório do IPCC em 2007, onde foi apontado que as emissões de carbono provenientes do desmatamento e da degradação florestal correspondem a aproximadamente 17% das emissões globais de GEE, a comunidade científica e as autoridades apontam que a melhor forma de diminuir essas emissões é o combate ao desmatamento nas florestas tropicais, e a recuperação de áreas degradadas, além da diminuição das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis. Portanto, houve a necessidade do desenvolvimento de mecanismos que englobassem as nações emergentes detentoras desses ambientes nas políticas de redução dos GEE (LEITE e FERREIRA, 2012).

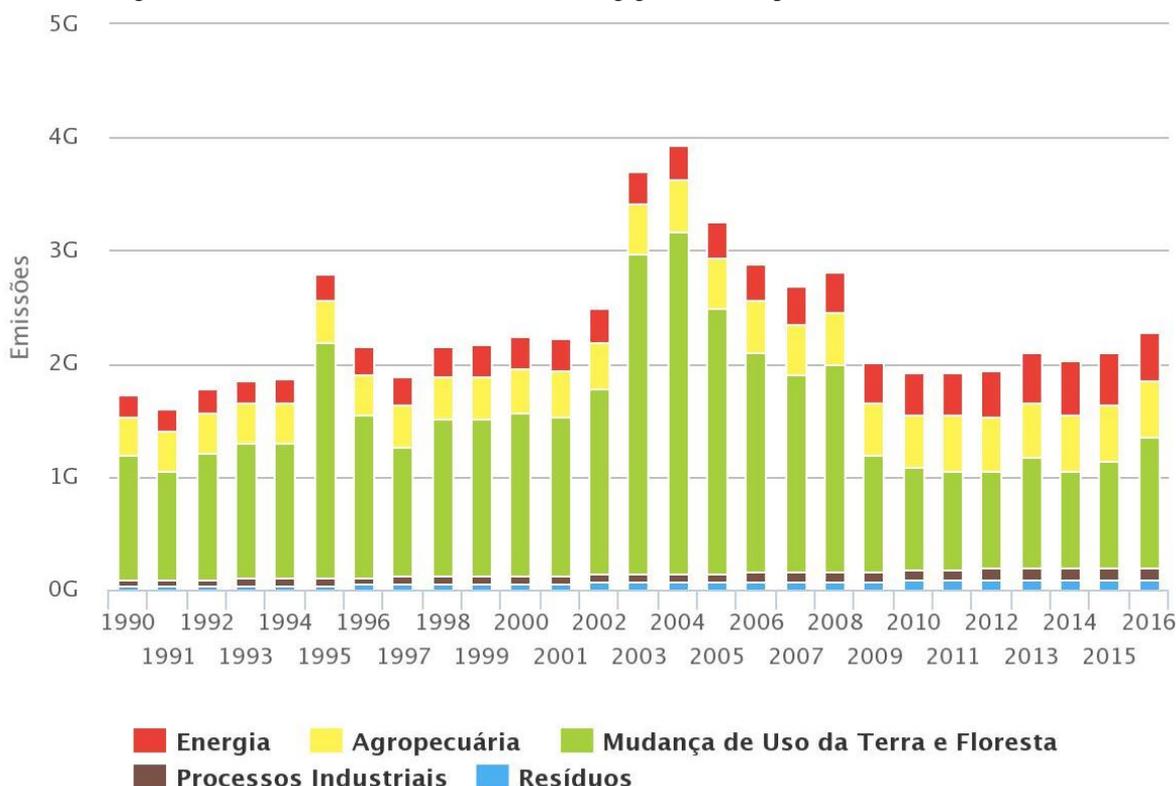
Nesse cenário, existem diversos programas políticos, sobretudo internacionais, em resposta às preocupações quanto à emissão dos GEE resultantes do desmatamento. Uma das propostas em discussão é a “Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal” (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation – REDD*), criada em 2007 durante a 13ª Reunião das Partes da Convenção da ONU sobre Mudanças Climáticas (COP 13), realizada em Bali, na Indonésia. Este programa trata de um mecanismo de compensação para a redução das emissões de carbono provocadas pelo desmatamento e queimada das florestas, sendo adotado em conjunto com medidas que promovam não só a redução do desmatamento, mas a preservação e gestão sustentável do meio ambiente. Um aprimoramento dessa sigla é o REDD+, incluindo esforços direcionados para as ações de conservação e manejo sustentável das florestas e atividades que propiciam o aumento dos estoques de carbono das florestas nativas, além de incluir práticas sustentáveis na agricultura com baixas emissões de carbono (EMBRAPA, 2014).

Em relação ao Brasil, as emissões de GEE apresentaram redução nos principais setores nos últimos anos (Figura 2), devido a políticas governamentais que vêm atuando principalmente na redução dos desmatamentos na região amazônica. No entanto, o Brasil ainda apresenta grande potencial de redução dos GEE, principalmente no setor agropecuário, sobretudo na pecuária de corte, no qual, segundo dados da *Climate and Land-Use Alliance* (CLUA) publicados por FERREIRA Jr. et al. (2014), a emissão de CO₂ em áreas de pastagem

degradada é em torno de quatro toneladas por hectares/ano, enquanto em áreas de pastagens restauradas, o carbono fixado no solo é de aproximadamente 3,6 toneladas por hectares/ano.

Segundo os mesmos autores, cerca de 80% dos desmatamentos recentes são direcionados para as áreas de pastagem, sendo necessário o desenvolvimento de mecanismos de fiscalização que limite este processo, além de incentivar a intensificação da pecuária de forma mais sustentável e mais produtiva, podendo contribuir de forma substancial para a redução das emissões de GEE (FERREIRA Jr.*et al.*, 2014).

Figura 02 – Emissões dos GEEs no Brasil, em gigatoneladas, por setores da economia.



Fonte: SEEG (2016).

Diante desse cenário, a recuperação de áreas de pastagens degradadas é uma das estratégias para o aumento na produção de carne, sem a necessidade de expansão dessas áreas(ou de novos desmatamentos). A recuperação através do manejo adequado e da reposição de nutrientes ao solo contribui para a sustentabilidade do sistema de produção de carne em pastagens, além de minimizar os danos ao meio ambiente(DIAS-FILHO, 2011).

Em consonância com este cenário, o Governo Federal, no ano de 2010, criou o plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), voltado para o setor agropecuário, envolvendo uma série de medidas para uma agricultura mais eficiente e com baixa emissão de carbono. O objetivo geral do Plano ABC é promover a mitigação da emissão de GEE na agricultura,

melhorando a eficiência no uso de recursos naturais, aumentando a resiliência de sistemas produtivos e de comunidades rurais, além de possibilitar a adaptação do setor agropecuário às mudanças climáticas (PLANO ABC, 2011).

No entanto, as informações sobre a extensão e condições das pastagens no Brasil ainda são dispersas, pouco detalhadas e desatualizadas, com necessidade de estudos sobre a capacidade de suporte bovino, bem como sobre seu potencial de fixação dos GEE, uma vez que a falta de tais informações se configura como um entrave para a compreensão do problema e consequente adoção de medidas preventivas e/ou corretivas.

Assim, a recuperação de áreas de pastagens no Brasil, em especial no bioma cerrado (em sua maioria, cultivadas), tidas como degradadas, pode ser feito através do monitoramento da GPP por região ou localidade, propiciando o registro de parâmetros como o vigor e a capacidade de crescimento da vegetação e, conseqüentemente, uma melhor gestão e produtividade de tais áreas (REEVES *et al.*, 2002; FERREIRA *et al.*, 2012).

2.2 – Pastagens Cultivadas

No Brasil, a agropecuária desempenha um papel de significativa importância para a economia, correspondendo a aproximadamente 25% do PIB e 30% da ocupação do território nacional (FERREIRA Jr. *et al.*, 2014). Em 2013, o setor pecuário contribuiu com 30,4% do PIB do agronegócio e 6,87% do PIB brasileiro (CEPEA, 2014), o que evidencia a importância econômica e social desse setor para o país. Cabe salientar que, o Brasil é o maior exportador de carne bovina no mundo, detendo o maior rebanho comercial, com cerca de 215 milhões de cabeças (PPM, 2015).

Essa produção de carne é realizada, sobretudo, em pastos cultivados de forma extensiva (em geral, da espécie *Brachiaria*), com área estimada em 175 milhões de hectares, destes, estima-se que 100 milhões de hectares apresentem algum nível de degradação (LAPIG, 2016). O processo de degradação das pastagens é muito comum nos ecossistemas de pastagens tropicais, sendo que a perda de fertilidade natural dos solos é apontada como uma das principais causas de degradação (PADILHA *et al.*, 2009). Estes mesmos autores apontam três fatores que provocam a perda de fertilidade do solo, sendo: a) o manejo indiscriminado e excessivo da utilização do fogo; b) insetos-pragas e doenças; e c) fatores climáticos, quando, em ocorrência de estiagens prolongadas pode acarretar na formação e desenvolvimento de espécies invasoras, ou, em caso de excesso de umidade no período chuvoso, pode provocar a proliferação de insetos-pragas e doenças, bem como a perda de fertilidade do solo através do aceleramento dos processos de erosão e lixiviação.

Além disso, no processo de degradação das pastagens, outro fator determinante é a forma de manejo. Segundo Dias-Filho (2011), o manejo inadequado dessas áreas, como alta taxa de lotação, pastejo em intervalos de tempo inadequados, não reposição periódica de fertilizantes no solo, uso excessivo do fogo e falhas no estabelecimento, preparo inadequado do piquete, semente de baixo valor cultural e semeadura na época imprópria. Esse processo de degradação provoca a baixa produção de biomassa dessas áreas de pastagem e maior emissão de gases de efeito estufa.

Todavia, apesar dos números tão expressivos em relação à produção bovina e às áreas de pastagens disponíveis para produção, a pecuária brasileira é considerada de baixa produtividade (~1,1 cabeça/hectare). De acordo com Garcia *et al.* (2013), os principais motivos para esta baixa produtividade são: (a) a baixa capacidade de suporte do pasto, ou seja, baixa quantidade de animal por hectare; (b) baixa remuneração por parte dos frigoríficos; e (c) elevados gastos com recuperação de pastagem, suplementação animal e mão-de-obra. Portanto, um melhor desempenho no setor está intimamente ligado ao aumento da capacidade de suporte do pasto, o que, para a maioria das regiões do país, está abaixo do ideal, em torno de 1,1 unidade animal/hectare (UA/ha).

A capacidade de suporte pode ser definida como a taxa de lotação que permita um ganho por animal e por área, com a manutenção da boa condição da pastagem (EMBRAPA, 2002). Esta, por sua vez, é um dos grandes desafios no manejo das pastagens, visto que varia espacialmente e temporalmente, de acordo com o tipo de solo, sazonalidade climática, e o tipo de manejo ao longo dos anos (EUCLIDES FILHO *et al.*, 1996). A falta de um manejo eficiente das áreas de pastagem, junto com a alta densidade de animais, pode levar à degradação dessas áreas, prejudicando a produção animal e sua capacidade de suporte futura (EMBRAPA, 2002).

O desempenho animal está correlacionado com seu consumo no pasto, sendo este sua principal fonte de nutrientes. O conhecimento da quantidade de forragem consumida pelo animal e sua qualidade nutricional é de fundamental importância, sobretudo em países como o Brasil, onde a pecuária se desenvolve com base em áreas abertas e extensivas, e que atenda as exigências para o crescimento e renovação (PARIS *et al.*, 2009; PINHEIRO *et al.*, 2014).

Portanto, uma das ações primordiais para o aumento da produtividade da pecuária é o investimento na recuperação de pastagens degradadas. Neste contexto, o Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento criou o Plano Agricultura de Baixo Carbono (2013), dentre as ações governamentais para a recuperação de pastagens degradadas, cujo objetivo é disponibilizar crédito aos produtores rurais para a adoção de tecnologias de redução das

emissões de GEE. A meta estabelecida no programa ABC (vigência até 2020) é a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e a implantação de 4 milhões de hectares destinados à integração lavoura-pecuária-floresta (CNA, 2014).

Em relação às medidas para o aumento da produtividade, o Programa Mais Carne no plano Mais Pecuária (BRASIL, 2014) tem como objetivo dobrar a capacidade de suporte médio das pastagens, que hoje é de aproximadamente 1,3 animal/hectare. Com o aumento da capacidade de suporte das pastagens para 2,6 animal/ha, a produção de carne no Brasil poderá ser 40% maior, sem a necessidade de expansão da fronteira agrícola, além de disponibilizar 46,2 milhões de hectares para outras atividades (VALLE *et al.*, 2013).

Essas medidas são importantes devido à urgência das questões ambientais relacionadas ao aumento da temperatura média do planeta e, por outro lado, pelo crescimento da demanda por alimentos no mundo. Estima-se que esta demanda em 2050 seja o dobro da que se tem atualmente, sendo o grande desafio produzir mais sem provocar danos ao meio ambiente, conservando a qualidade de vida das pessoas (ROSA e SANO, 2013). Neste cenário, a cadeia produtiva deve buscar por alternativas mais eficientes, tendo como resultado o ganho de eficiência produtiva, minimizando os impactos ao meio ambiente.

Neste contexto, uma das alternativas que vêm sendo discutidas para uma melhor eficiência das pastagens, tanto do ponto de vista ambiental como o produtivo, é o aumento de sua produtividade primária bruta, detalhada a seguir.

2.3 – Produtividade Primária Bruta (GPP)

Considerando o sistema solo-planta-atmosfera, a captação do carbono atmosférico pela planta envolve um processo em que o CO₂ atmosférico entra no sistema através da fotossíntese em escala foliar. Nessa escala, a fotossíntese depende da capacidade bioquímica fotossintética das folhas, temperatura, concentração de CO₂, radiação solar visível absorvida e água (SILVA, 2013). Essa retirada do CO₂ da atmosfera pela vegetação é baseada no método que sequestra e armazena carbono a partir do aumento da produtividade primária bruta. A GPP é a taxa no qual o CO₂ presente na atmosfera é convertido pela atividade fotossintética em substância orgânica, e pode ser medida por unidade de massa por área e tempo (CHAPIN *et al* 2011; SILVA, 2013; ARAGÃO, 2004).

A atividade fotossintética representa o caminho pelo qual praticamente toda a energia entra na biosfera. Esta ocorre dentro de organelas presentes nas células das plantas, denominadas cloroplastos, onde se encontram moléculas fotorreceptoras chamadas clorofilas, capazes de armazenar radiação (EMBRAPA, 2014). A radiação solar é a fonte primária para o

processo fotossintético, sendo que, de toda a radiação incidente sobre as plantas, a comunidade vegetal está adaptada para absorver a radiação no espectro do visível, que fica no intervalo de 400 nm a 700 nm, conhecido como radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Cerca de 85% a 90% da PAR é absorvida pela folha, sendo o restante refletido em sua superfície ou transmitido através desta. Dessa forma, com a energia absorvida pelas plantas, inicia-se o processo de conversão do dióxido de carbono (CO₂) e da água (H₂O) em açúcares. Neste processo, as moléculas de água se dividem em átomos de hidrogênio (H) e oxigênio (O), onde este último é liberado na atmosfera como subproduto, tornando possível a vida em nosso planeta. O hidrogênio oriundo da água converte o carbono inorgânico do CO₂ em matéria orgânica, sendo este processo caracterizado de produtividade primária, responsável por proporcionar a energia que alimenta muitos processos bióticos no planeta, como microorganismos e outros animais, bem como a diversidade de organismos numa determinada zona ecológica (EMBRAPA, 2006; ROSA e SANO, 2013).

Alguns fatores podem afetar o processo de eficiência da fotossíntese, como a temperatura do ar, podendo ser considerada ora como um fator limitante, ora como estimulante do processo fisiológico da planta. O efeito da temperatura no processo de fotossíntese depende da espécie e das condições ambientais da planta que está crescendo. A fotossíntese aumenta conforme a temperatura do ar cresce, devido ao aumento da atividade enzimática. Entretanto, em elevadas temperaturas, a difusão do CO₂ e a foto-respiração ficam comprometidas, onde o CO₂ começa a escapar, diminuindo o processo fotossintético. A temperatura controla a taxa de metabolismo da planta, determinando a quantidade de fotossíntese; em temperaturas elevadas, a eficiência do processo fotossintético é prejudicada, diminuindo a taxa de fotossíntese (ROSA e SANO, 2013).

Em relação à classificação das plantas quanto ao mecanismo de redução do CO₂, podem-se classificar as plantas em três grupos: plantas C₃, C₄ e plantas CAM (metabolismo do ácido crassuláceo), sendo que as plantas do primeiro grupo (C₃) (Ex: soja, trigo, feijão e algodão) são mais sensíveis à alta intensidade de radiação. Quando esta atinge elevados níveis, a taxa de fotossíntese não aumenta mais, visto que o ponto de saturação é atingido quando a fotossíntese torna-se constante. Já as plantas do tipo C₄ não se saturam com o aumento da intensidade da radiação, mantendo taxas de assimilação do CO₂ atmosférico. Sendo essas mais eficientes na assimilação do carbono atmosférico, podemos citar como exemplos de plantas C₄, pastagens, como as da espécie *Brachiaria*, cana-de-açúcar, milho, entre outras.

Outro elemento de suma importância para a fotossíntese é a água. Embora apenas 1% da água absorvida pela planta seja utilizada para a fotossíntese, há evidências de que o déficit hídrico é um fator limitante para o processo fotossintético. Para a fixação do carbono, as plantas precisam perder água, onde a difusão do vapor d'água e do CO₂ acontecem nos estômatos da planta. Quando estes estão abertos, o CO₂ é difundido internamente para os locais de fixação, enquanto o vapor d'água é difundido no caminho inverso para a atmosfera (FUENTES *et al.*, 2006; ROSA e SANO, 2013).

Os nutrientes também são importantes indicadores da eficiência do processo de fotossíntese, tal como o nitrogênio e o fósforo. O nitrogênio apresenta um efeito importante na fotossíntese, visto que a maior parte desse elemento é encontrada nas folhas contidas de enzimas fixadoras de carbono. Ou seja, existe uma relação positiva entre a quantidade de nitrogênio nas folhas da planta e o processo de fotossíntese. No entanto, esta relação depende de outros fatores, como a radiação, água e CO₂ (FIELD *et al.*, 1995).

Portanto, a Produtividade Primária Bruta (ou Fotossíntese Bruta) depende de uma série de fatores, consistindo na cisão da molécula de água, utilizando a energia solar para ligar moléculas de carbono, e resultando na produção de carboidratos (açúcares) e oxigênio molecular (EMBRAPA, 2006).

2.4 – Estimativa da Produtividade Primária Bruta com Dados Satelitários

A natureza extensiva das pastagens no Brasil, combinada com a necessidade de dados mais precisos e detalhados sobre essas áreas, indica o uso de ferramentas que auxiliem no norteamento de políticas públicas. Nesse sentido, o uso das técnicas de sensoriamento remoto se destaca, por seu potencial em identificar áreas de pastagens cultivadas em diferentes escalas espaciais e temporais.

No que diz respeito às contribuições do sensoriamento remoto para questões ambientais, vale ressaltar que, diante da crescente notoriedade que as discussões relacionadas às mudanças climáticas têm adquirido nas últimas décadas, metodologias que aplicam imagens orbitais para a identificação de alterações na superfície são de suma importância. As possibilidades de aquisição de informações ambientais, através de técnicas de sensoriamento remoto e de imagens orbitais, permitem uma análise geral de grandes áreas, se comparadas aos dados pontuais disponibilizados pelas estações de controle e torres micrometeorológicas de fluxo de carbono (SILVA *et al.*, 2013).

A obtenção de variáveis biofísicas, sobretudo aquelas ligadas à mensuração do carbono em ecossistemas naturais e áreas antrópicas, é um importante fator para o planejamento ambiental de qualquer região. No entanto, essas informações ainda são cercadas de muitas dúvidas, atribuídas à insuficiência de dados concretos sobre a eficiência dos diversos sistemas naturais e antrópicos em absorver carbono atmosférico, e com isso aumentar a produtividade primária. Dessa forma, torna-se relevante o desenvolvimento de modelos para a estimativa da produtividade primária e fitomassa acima de solo, sendo estes ainda uma fonte de incerteza dos estoques de carbono em sistemas naturais e antrópicos (GUSSON, 2014).

Neste sentido, nos últimos anos, foram formulados modelos biogeoquímicos para quantificação do carbono em grandes áreas. Um destes modelos é Forest-BGC, desenvolvido para análises em grandes escalas temporais e espaciais, sendo combinado com dados de um sistema de informações geográficas - SIG (RUNNING e COUGHLAN, 1988). Outro modelo é o MBL-GEM, desenvolvido para estudos de florestas tropicais em escala local ou regional (RASTETTER *et al.*, 1991 e MCKANE *et al.*, 1995). Ambos são utilizados em estudos da dinâmica do carbono e nitrogênio, nos compartimentos solo e vegetação.

O modelo CASA (POTTER *et al.*, 1993; POTTER *et al.*, 1998) criado para a análise global da produtividade primária líquida (NPP), utilizando dados de sensoriamento remoto com entrada de dados paramétricos. Este modelo gera produtos de NPP com resolução espacial de 1 grau de latitude em intervalos mensais (aproximadamente 100 km²).

Baccini *et al.* (2012) estimaram a biomassa Pan-Tropical para grandes áreas do globo em sistemas florestais. No caso, o mapa de biomassa produzido por estes autores utiliza imagens de 2007 e 2008 do MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, produto NBAR, com resolução espacial de 500 metros. Estes dados espectrais do MODIS foram calibrados com mais de 2000 pontos de biomassa estimados pelo satélite ICESAT LIDAR (sensor Glas – pontos de laser para medir a altimetria no solo). Estas estimativas foram derivadas de inventários de campo para identificar a estrutura da vegetação dentro dos pontos LIDAR (para algumas amostras inventariadas em campo). Depois de calibrados com o LIDAR, este produto foi utilizado para calibrar as imagens MODIS, gerando um dos primeiros mapas de biomassa Pan-Tropical.

Outra metodologia utilizada para a estimativa do estoque de carbono /biomassa acima do solo emprega imagens de RADAR interferométrico, metodologia esta que se demonstra promissora. No entanto, estimativas de biomassa ao longo de grandes períodos de tempo e em escalas regionais não são empregadas com sensores ativos, devido aos altos custos envolvidos, sendo as imagens ópticas uma melhor solução (VELOSO *et al.*, 2015).

Dessa forma, vêm sendo desenvolvidas metodologias que estimam sequestro de carbono/produtividade primária bruta através dos parâmetros espectrais das imagens ópticas, e com poucos dados de superfície. Uma das metodologias que se destaca é a empregada na geração do produto MOD17A2H do sensor MODIS/TERRA, que fornece medidas de produtividade primária bruta para todo o globo. Esse produto é utilizado para definir o fluxo dinâmico de carbono terrestre, bem como a sazonalidade climática deste, sendo de significativa importância para a modelagem climática (PAIVA e FERNANDES, 2015). A modelagem da produtividade primária tem como base equação 01;

$$GPP = APAR * \epsilon f \quad (01)$$

Onde: APAR é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, proposto por Monteith (1972); ϵf representa a eficiência fotossintética da vegetação ou eficiência no uso da radiação.

Nessas estimativas, a quantificação da produtividade primária bruta por sensoriamento remoto óptico sugere o uso do modelo da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação – APAR, que é usualmente expressa na unidade de W/m^2 , baseado na radiação solar e no desenvolvimento das folhas, podendo ser aplicado conjuntamente com dados de sensores remotos, além da estimativa do uso da eficiência da luz para determinada espécie de planta.

A APAR depende da quantidade de radiação solar que chega ao local e da capacidade da vegetação em absorver esta radiação. Esta radiação interceptada pela vegetação está diretamente relacionada à área foliar vegetativa, que pode ser detectada por sensoriamento remoto. Na modelagem do MOD17A2, a estimativa da APAR é realizada segundo a equação 02;

$$APAR = FPAR * PAR \quad (02)$$

Onde: FPAR (MJm^{-2}) é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e PAR (MJm^{-2}) é a radiação fotossinteticamente ativa incidente sobre a vegetação.

A PAR corresponde à fração do espectro da radiação solar global entre os comprimentos de 400 nm e 700 nm, utilizada no processo de fotossíntese (FINCH *et al.*, 2004). Na ausência de medidas de PAR, a mesma pode ser estimada em função da radiação solar de onda curta incidente, sendo que apenas uma fração da PAR é absorvida no processo

de fixação do carbono atmosférico. No produto MOD17A2, a PAR é estimada com as informações disponibilizadas pelo banco de dados meteorológico de larga escala da NASA (*Global Modeling and Assimilation Office – GMAO*), com resolução de 1° por 1,25°. A estimativa de PAR é realizada com base na equação 03.

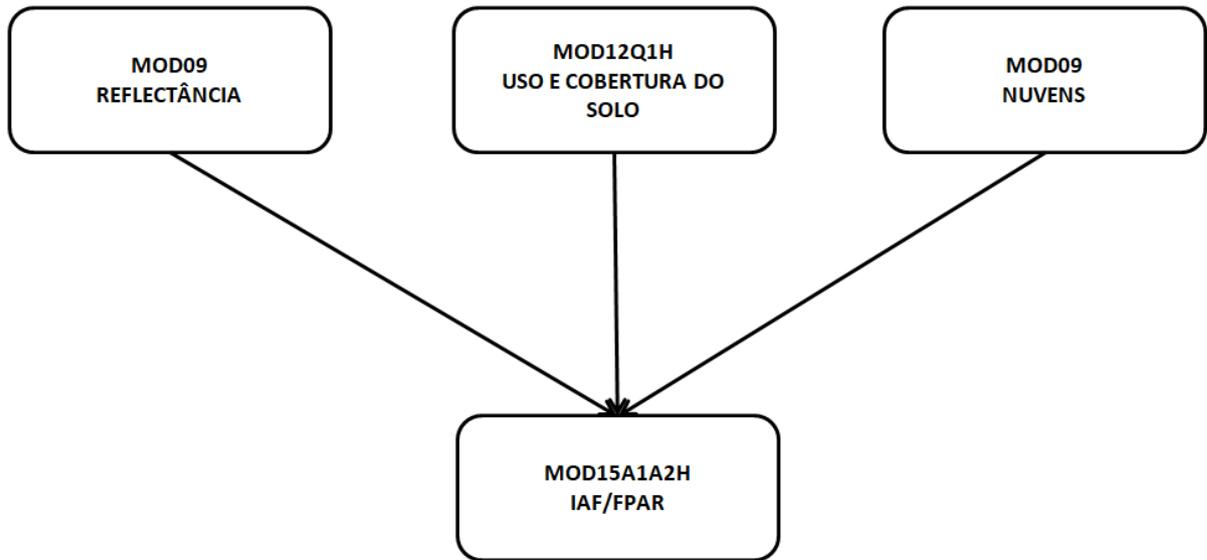
$$\text{PAR} = \text{Rsolar} * 0,45 \quad (03)$$

Onde: Rsolar é a radiação solar de onda curta incidente (MJm^{-2}); e 0,45 é o fator de aproveitamento da luz solar.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FPAR) representa a fração da radiação de PAR, que é absorvida pela vegetação no processo de fotossíntese. A Fração da PAR absorvida pela vegetação em (MJ m^{-2}) é disponibilizada pelo produto MOD15A2H e entra no algoritmo do produto MOD17A2H para o cálculo da GPP (KNYAZIKHIN *et al.*, 1999).

O algoritmo de estimativa da FPAR do produto MOD15Q1H é baseado na teoria da transferência radioativa tridimensional, para inferir o quanto de radiação fotossinteticamente ativa (400 nm a 720 nm) a vegetação está absorvendo no processo da fotossíntese. A partir desse parâmetro é possível avaliar o acúmulo de biomassa e as trocas de energia no meio analisado. O algoritmo do MOD15 possui interfaces com os produtos de refletância da superfície (MOD09), cobertura do solo (MOD12Q1) e nuvens (MOD09). Estes produtos são disponibilizados gratuitamente pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey- USGS*). A Figura 03 ilustra o processo de geração dos produtos do MOD15.

Figura 03 – Produtos utilizados para geração da FPAR/IAF (MOD15).



Fonte: INPE, 2015.

Quando esse método falha ao localizar uma solução (visando gerar o produto MOD15Q1H), um algoritmo de reserva é utilizado, baseado nas relações entre o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e a FPAR (MYNENI et al., 2002; KNYAZIKHIN et al., 1999). Na literatura muitos estudos vêm demonstrando uma alta correlação entre a FPAR e o NDVI (SELLERS *et al.*, 1992; POTTER *et al.*, 1993; SELLERS *et al.*, 1997; DEFRIES *et al.*, 1997; FRIEDL, 1997; DEFRIES e LOS, 1999; GOETZ *et al.*, 1999), sendo que muitos pesquisadores utilizam essas imagens para a estimativa da FPAR.

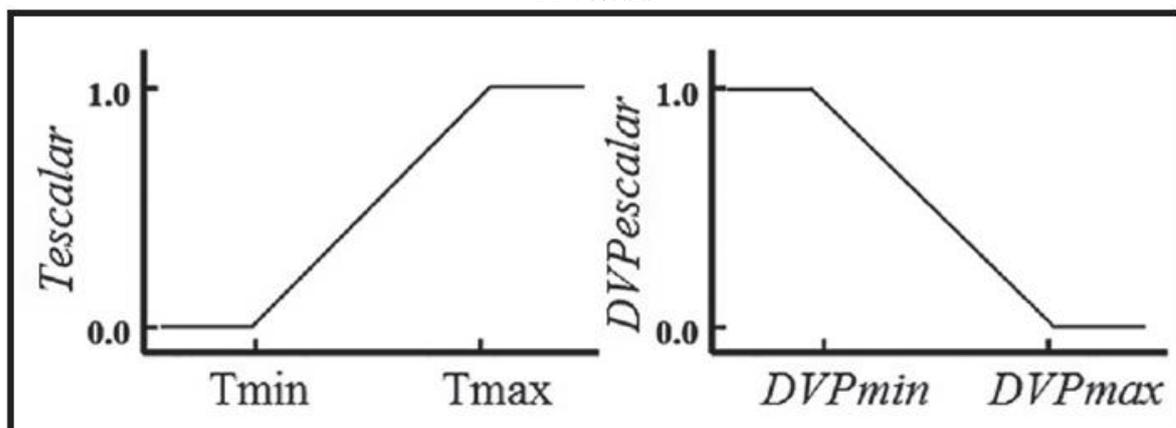
Em relação à eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa em biomassa, esta é comumente denominada de eficiência de uso da luz (LUE) (do inglês *Light Use Efficiency*) em [g C.MJ⁻¹], segundo Monteith (1972). Na metodologia do MOD17A2, a eficiência de conversão da PAR em carbono pode ser calculada por meio da equação 04;

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{\max} \times \text{Tescalar} \times \text{DPVescalar} \quad (04)$$

onde: ε_{\max} = eficiência máxima de conversão da radiação fotossinteticamente ativa ou comumente denominada de luz [g C.MJ⁻¹]; Tescalar = fator de atenuação de E_{max}, em função de dois valores extremos de temperatura do ar, para os quais $\varepsilon_f = E_{\max}$ e $\varepsilon = 0$, denominados (T_{max}) e (T_{min}), respectivamente; T_{max} representa o valor de temperatura do ar em [°C], o qual permite que ε_f alcance seu valor máximo; e T_{min} representa o valor de temperatura do ar em [°C] que faz com que ε_f seja igual a zero; Tescalar assume valores entre 0 e 1, para valores de temperatura do ar entre T_{min} e T_{max}, respectivamente, sendo uma função linear

diretamente proporcional à temperatura do ar ao longo do dia; $DPV_{escalar}$ = fator de atenuação de E_{max} em função de dois valores extremos de déficit de pressão de vapor (DPV), para os quais $\epsilon = E_{max}$ e $\epsilon = 0$, denominados (DPV_{min}) e (DPV_{max}), respectivamente; DPV_{min} representa o valor de DPV em [Pa] que permite que ϵ alcance seu valor máximo; e DPV_{max} representa o valor de DPV em [Pa] que faz com que ϵ seja igual a zero; $DPV_{escalar}$ assume valores entre 0 e 1, para valores de DPV entre DPV_{max} e DPV_{min} , respectivamente, sendo uma função linear inversamente proporcional ao DPV ao longo do dia. Esses valores refletem a influência da temperatura do ar e do DPV no comportamento da eficiência do uso da luz (ϵ), enquanto fatores limitantes desse processo (Figura 04).

Figura 04 – Gráfico da função linear entre os fatores de atenuação da eficiência do uso da luz, $T_{escalar}$ e $DPV_{escalar}$



Fonte: MOD17 User's Guide (2015).

Isto torna a lógica da eficiência da conversão da radiação uma forma atraente para prever a GPP a partir de dados de sensoriamento remoto (PRINCE 1991; PRINCE e GOWARD, 1995; HUNT *et al.*, 1994). A eficiência do uso da luz é uma característica fundamental das plantas, pois propicia a competitividade entre populações, no que se refere ao melhor aproveitamento da energia luminosa e sua transformação em energia química (GUIMARÃES *et al.*, 2010). Para as estimativas da GPP utilizando sensores ópticos, a eficiência de uso da luz torna-se um fator limitante, por apresentar grande variabilidade espacial, onde cada espécie de planta se diferencia no aproveitamento desta energia e sua transformação em energia química.

Na formulação da base dessas metodologias, Monteith (1972) inclui uma eficiência máxima de conversão da radiação (E_{max}), atenuada por essas variáveis ambientais ($T_{escalar}$ e $DPV_{escalar}$), é que ao fim influenciam no desenvolvimento da planta. Nas primeiras aplicações, esse princípio atribui uma constante universal da E_{max} (Eficiência Máxima) para

os diferentes tipos de vegetação. No entanto, Russell *et al.* (1989) demonstraram significativa variação da eficiência máxima em diferentes tipos de vegetação. Em processos metodológicos como do MOD17A2, os valores de Emax para cada tipo de vegetação são obtidos no banco de dados de Parâmetros dos Biomas (BPLUT - Biome Parameter Look-Up Table), acessado pelo algoritmo do produto MOD17A2. A Tabela 01 apresenta os valores e eficiência máxima de uso da luz, bem como as variáveis ambientais de atenuação deste parâmetro para cada bioma (MOD12Q1).

Tabela 01 –Parâmetros de calibração do modelo específicos para cada tipo de uso e ocupação do solo.

Biomass	E_{max} (g C/m²/d/MJ)	T_{min_min} (C)	T_{min_max} (C)	VPD_{min} (Pa)	VPD_{max} (Pa)
Gramíneas (<i>Grasses</i>)	0.860	-8.00	12.02	650.0	5300.0
Culturas de cereais (<i>Cereal crops</i>)	1.044	-8.00	12.02	650.0	4300.0
Arbustos Espaçados (<i>Open Shrubs lands</i>)	0.841	-8.00	8.80	650.0	4800.0
Arbustos Fechados (<i>Closed Shrubs lands</i>)	1.281	-8.00	8.61	650.0	4700.0
Savanas (<i>Woody Savanna</i>)	1.239	-8.00	11.39	650.0	3200.0
Cerrado (<i>Savanna</i>)	1.206	-8.00	11.39	650.0	3100.0
Floresta Perene de folhas largas (<i>Evergreen Broad-leaf forest</i>)	1.268	-8.00	9.09	800.0	3100.0
Floresta caducifólia de folhas largas (<i>Deciduous Broad-leaf forest</i>)	1.165	-6.00	9.94	650.0	1650.0
Floresta Ombrófila de folhas Aciculares (<i>Evergreen Needle-leaf forest</i>)	0.962	-8.00	8.31	650.0	4600.0
Floresta Estacional Decidual de folhas aciculares (<i>Deciduous Needle-leaf forest</i>)	1.086	-8.00	10.44	650.0	2300.0
Floresta Mista (<i>Mixed forests</i>)	1.051	-7.00	9.50	650.0	2400.0

Fonte: MOD17 User's Guide (2015).

Na metodologia do MOD17A2 o Emax para gramíneas é de $0,86 \text{ g C.MJ}^{-1}$ (Tabela 01), ou seja, uma pastagem no Brasil é tratada da mesma forma como uma pradaria localizada no oeste dos Estados Unidos, sendo que este valor de Emax é utilizado como padrão para todas as variedades de gramíneas no planeta terra. Além do que, para análises que necessitam de um maior nível de detalhe, este produto apresenta algumas desvantagens, devido à sua resolução espacial, que é de 1 km no produto MOD17A2 coleção 5, e de 500 metros na coleção 6; ambos também empregam dados climáticos de re-análise em larga escala espacial (1° por $1,25^\circ$), o que pode provocar alguma incompatibilidade, sobretudo em áreas de pastagens, que apresentam grande variabilidade espacial. Esta técnica de re-análise consiste na coleta de dados a partir de estações meteorológicas de superfície, em aviões, balões, navios e imagens de satélite, sendo estes dados utilizados para gerar séries históricas das variáveis meteorológicas, no qual o histórico do estado atmosférico pode ser reconstruído de forma a atender as comunidades de pesquisa e monitoramento do clima (KALNAY *et al.*, 1996).

Nesse sentido, metodologias que seguem o mesmo princípio vêm ganhando destaque na estimativa da GPP por dados satelitários. Dessa forma, Bastiaanssen e Ali (2003) adaptaram a plataforma de parametrização dos fluxos de calor baseado na análise espectral de imagens de satélites, através do SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), voltado para a estimativa da evapotranspiração, quando, combinado ao modelo CASA (*Carnegie Ames Stanford Approach*), que calcula a APAR, e que, juntamente com dados de superfície, finaliza-se a estimativa da produtividade primária bruta (BRADRÃO *et al.*, 2007).

O algoritmo SEBAL, consagrado como uma metodologia eficaz na estimativa dos componentes do balanço de radiação, energia e evapotranspiração, vem sendo aplicado em várias partes do mundo, gerando resultados consistentes. Esse algoritmo tem como principal objetivo calcular a evapotranspiração usando imagens de satélites e alguns dados de superfície de estação meteorológica, como velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura do ar, pressão atmosférica e radiação solar global (VELOSO, 2015).

Em sua formulação inicial, o SEBAL utilizava as imagens dos satélites Landsat 5 e 7, mas pode ser empregado em qualquer satélite que colete imagens que propiciem o cálculo do albedo, índices de vegetação e temperatura da superfície. Isso pode ser feito com sensores que imageiam faixas do espectro visível, infravermelho próximo, médio e distante, e, em especial, na região do infravermelho termal (BEZERRA, 2004). Na sua versão atualizada, esta metodologia é utilizada para estimar a produtividade primária bruta em imagens do satélite Landsat 8. Este satélite vem equipado com os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), com avanços significativos no imageamento terrestre, tal

como melhorias na resolução espectral (11 Bandas) e radiométrica (16 Bits), visto que possibilitam a melhora na definição e qualidade dos dados obtidos por esses sensores. A Tabela 02 apresenta algumas características espectrais dos sensores OLI e TIRS.

Tabela 02 – Características dos sensores OLI e TIS do satélite Landsat-8.

Número de Bandas	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
(B1) Costal	0,433 – 0,453	30
(B2) Azul	0,450 – 0,515	30
(B3) Verde	0,525 – 0,600	30
(B4) Vermelho	0,630 – 0,680	30
(B5) Infravermelho Próximo	0,845 – 0,885	30
(B6) Infravermelho Médio	1560 – 1660	30
(B7) Infravermelho Médio	2100 – 2300	30
(B8) Pancromático	0,500 – 0,680	15
(B9) Cirrus	1360 – 1390	30
TIRS (Thermal Infrared Sensor)		
(B10) LWIR – 1	10,6 – 11,2	100
(B11) LWIR – 2	11,5 – 12,5	100

Fonte: NASA (2013).

Portanto, as técnicas de sensoriamento remoto apresentam importante papel na identificação das alterações na superfície terrestre em diferentes áreas, oferecendo maior flexibilidade no que se refere ao tempo e recursos disponíveis para a estimativa de parâmetros biofísicos, configurando em uma técnica para o estudo da variação espacial e temporal da GPP. Além disso, com a aplicação deste método, é possível analisar a variabilidade destes fenômenos em nível regional, diferentemente das metodologias convencionais que realizam estudos pontuais.

Existem outros métodos para a estimativa da produtividade primária bruta, dentre os quais se destaca a técnica da covariância de vórtices turbulentos, muito empregada para quantificar o fluxo de CO₂ em diversos ecossistemas. Esta técnica é realizada em torres de fluxo, porém limitada a um ponto na superfície, não levando em consideração os diversos alvos da área estudada, que se comportam de forma diferente. Ademais, seu custo e operacionalidade muitas vezes se apresentam restritivos para vários grupos de pesquisa (em

geral, são torres com 50 a 70 metros, em locais com acesso dificultado e bastante conservados).

Nessa perspectiva, alguns estudos vêm avaliando as técnicas de estimativa dos componentes do balanço de radiação, energia e GPP utilizando imagens de satélites, numa abordagem local, regional e até global, ao longo do tempo (séries temporais). Dessa forma, vem-se obtendo um melhor entendimento dos referidos parâmetros, diferentemente dos métodos tradicionais vinculados às estações meteorológicas, com análises pontuais para uma dada área geográfica.

CAPÍTULO 3–MATERIAIS E MÉTODOS

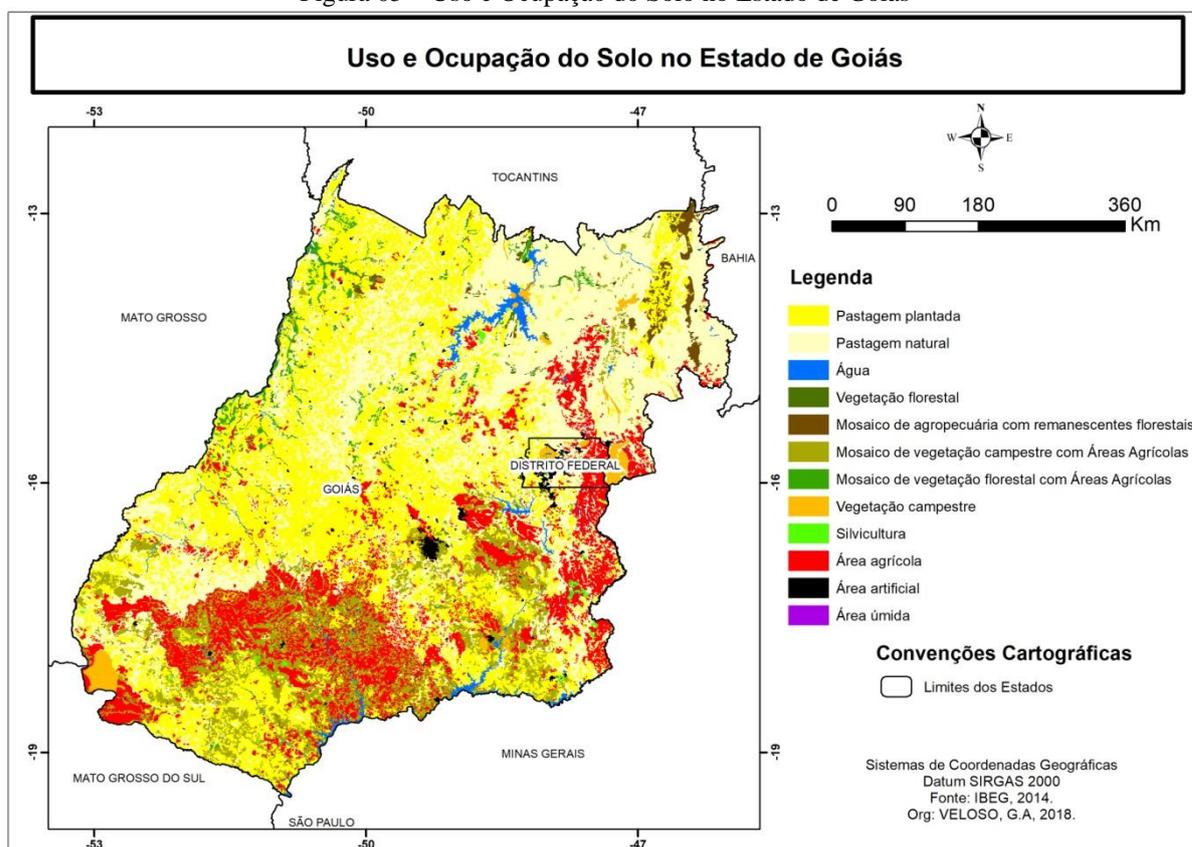
3.1 – Caracterização da Área de Estudo

Este capítulo apresenta as áreas de estudo abordadas nesta tese, destacando-se suas localidades e principais características ambientais, tais como: clima, hidrografia, vegetação e tipos de solo.

3.1.1– Estado de Goiás

Localizado na região central do Brasil, o estado de Goiás limita-se ao norte com o estado do Tocantins, a leste e sudeste com o estado de Minas Gerais, a leste com o estado da Bahia, a sudoeste com o estado do Mato Grosso do Sul e a oeste com o estado do Mato Grosso (Figura05). Possui 246 municípios e uma área total de 340.086,698 km², sendo o 7º estado brasileiro em extensão territorial (SEGPLAN-GO, 2011). Goiás é o único estado totalmente inserido na região core do Cerrado, bem como o quinto mais antropizado, com aproximadamente 55% do seu território original convertido em agricultura (15%) e pastagem cultivada (40%) (GARCIA *et al.*, 2013; SCARAMUZZA *et al.*, 2017).

Figura 05 – Uso e Ocupação do Solo no Estado de Goiás



Fonte: IBGE (2014).

Os principais grupos de solo em Goiás são o Latossolo, Cambissolo, Argissolo, Nitossolo, Neossolo Quartzarenico, Neossolo Litólico, Plintossolo e Gleiossolo, sendo o Latossolo o predominante.

O clima do Estado possui duas estações climáticas bem definidas: uma com altos índices pluviométricos (1100 a 2100 mm), entre os meses de outubro a abril, onde ocorrem aproximadamente 95% das precipitações anuais; outra com baixos índices pluviométricos (20 a 200 mm), entre os meses de maio a setembro.

Em relação à temperatura, esta apresenta os maiores valores nos meses de agosto e setembro (com médias em torno de 34°C), sobretudo no noroeste do Estado, enquanto que as temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de junho e julho (médias em torno de 12°C) (SEGPLAN-GO, 2011).

A vegetação do Estado apresenta predominância das fitofisionomias do bioma Cerrado, cobrindo aproximadamente 90% do território, com algumas pequenas áreas de formação florestal, conhecidas como Mato Grosso Goiano (SEGPLAN-GO, 2011).

O relevo do Estado é formado predominantemente por terras planas (Chapadões), correspondendo a aproximadamente 65% do território, apresentando 4 superfícies regionais de aplainamento, sendo: a) entre 1100 e 1600m de altitude; b) entre 900 e 1000m; c) entre 650 e 1000 m; d) entre 250 e 550m de altitude (SEGPLAN-GO, 2011).

Tais características climáticas, solo e relevo (com baixa declividade) favoreceram o desenvolvimento da pecuária de corte, sendo uma das principais atividades econômicas do Estado, com uma representatividade de aproximadamente 38% do território (SANO, 2008). Além disso, dados do Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2016) indicam que Goiás é o terceiro na produção bovina do país, com um rebanho de aproximadamente 25 milhões de cabeças de gado, ainda que com baixa lotação média.

3.1.2 – Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho

A Bacia hidrográfica do Rio Vermelho – BHRV, está localizada no oeste do estado de Goiás, entre os paralelos 14°55' e 16°20' Sul e os meridianos 50°00' e 51°30' Oeste (Figura 06). Compreende uma área de 10.824,60 km², perfazendo uma extensão territorial de 11 municípios goianos de forma parcial e/ou completa (Goiás, Aruanã, Matrinchã, Britânia, Jussara, Santa Fé de Goiás, Fazenda Nova, Novo Brasil, Buriti de Goiás, Faina e Itapirapuã) (VIEIRA, 2013; SANTOS, 2014).

ABHRV tem um papel importante no Estado de Goiás, tanto do ponto de vista histórico, como cultural e político, pois foi em suas margens que se iniciou a exploração do

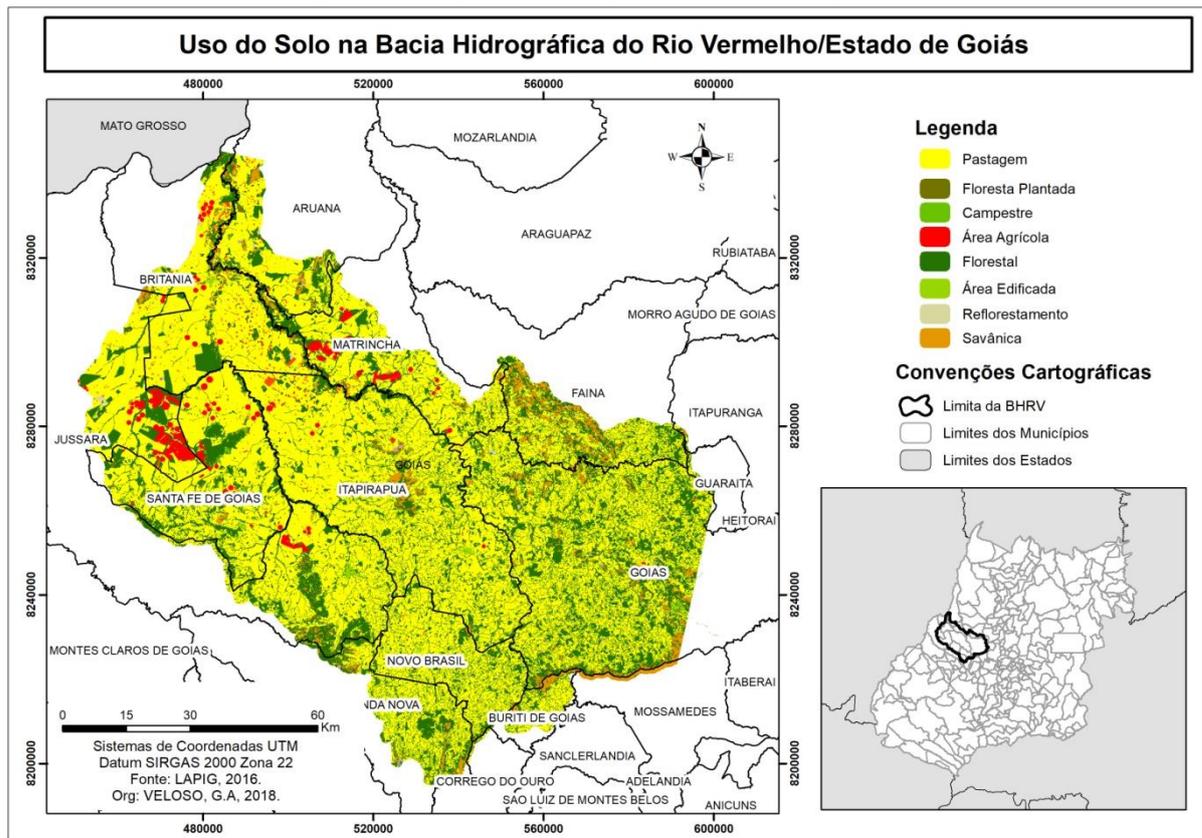
ouro, e em decorrência disso, o desenvolvimento de províncias ou povoados, culminando com a formação da primeira capital do Estado, em 1732 (lá permanecendo até 1942, quando a sede administrativa se transferiu para Goiânia). Após a exploração do ouro, o agronegócio ainda rudimentar passa a predominar, atuando como o indutor ao desenvolvimento. Atualmente, o desenvolvimento econômico pautado no agronegócio ainda é uma realidade nos dias de hoje, sendo associado ao uso intenso do solo, apresentando elevadas taxas de conversão do cerrado nativo em áreas de pastagens e lavouras. Sabe-se que na BHRV 68% das áreas estão antropizadas (convertidas), evidenciando essa economia, principalmente com base na produção agropecuária (VIEIRA; FERREIRA; GUIMARÃES, 2014). Por outro lado, a BHRV tem sido também palco importante para pesquisas científicas, dada suas características únicas em termos de relevo, hidrografia e uso da terra, além da proximidade com Goiânia.

Assim, essa área logo se torna um importante centro de pesquisa de campo para o Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG, vinculado à Universidade Federal de Goiás (UFG), com apoio da prefeitura de Goiás e da Universidade Estadual de Goiás (UEG). Atualmente, são desenvolvidos diversos projetos na região, em nível de mestrado e doutorado (como o presente estudo ora em avaliação), com o intuito de melhor compreender os parâmetros biofísicos nas áreas de pastagens no bioma Cerrado.

Justifica-se, assim, a escolha dessa área como campo de análise dessa pesquisa atuando de forma representativa no Estado e no bioma para aplicação de modelagem produtividade primária, evapotranspiração, dentre outros.

Em nível estadual, esta bacia representa uma ocupação humana de mais de 160 mil pessoas ($\pm 3,7\%$ da população total do estado), sendo que os municípios de Goiás e Jussara apresentam maior taxa de ocupação, com 1/4 da população da bacia (IBGE, 2010).

Figura 06 – Mapa de localização da área de estudo, BHRV



Fonte: LAPIG, 2016.

O Rio Vermelho tem sua nascente na formação Serra Dourada (aproximadamente 17 km da cidade de Goiás); com sua foz no emblemático rio Araguaia (em Aruanã - GO) percorrendo uma extensão de aproximadamente 120 km. Entre seus principais afluentes pela margem direita, destacam-se os rios Bugres e Ferreira, enquanto que na margem esquerda deságuam o Ribeirão da Água Limpa, Ribeirão Samambaia, rio Itapirapuã, Ribeirão do Capim, Ribeirão da Bocaína e o rio Uvá.

Os aspectos lito-geomorfológicos da bacia do rio Vermelho caracterizam-se pelas formações do Grupo Araguaia (Quartenário) e Formação Cachoeirinha (Terciário), apresentando superfícies de aplainamento distribuídas nas porções sul, sudeste, norte, noroeste e nordeste, e estruturas dobradas e relevo de morros e colinas distribuídas por todas as porções, e planície fluvial e faixas aluviais nos vales dos principais cursos d'água. As unidades pedológicas dispostas na área enquadram-se nas classes dos Latossolos, Argissolos, Gleissolos, Cambissolos, Plintossolos e Neossolos Quartzarênicos (VIEIRA *et al.*, 2015; DEL' ARCO *et al.*, 1999).

A BHRV está inserida totalmente no bioma Cerrado, apresentando as fitofisionomias do Cerradão e Campo Cerrado, assim como pastagens naturais e cultivadas (SANTOS,

2014). O Cerradão, conforme Moysés (2008) representa vegetações com presença de esclerofilia com fisionomia florestal, tendo seus elementos um maior desenvolvimento graças às condições do solo, favorecidas pelo sombreamento e umidade, tornando importantes componentes na decomposição da matéria orgânica utilizadas pelas plantas. O Cerrado apresenta três estratos: superior (árvores entre 10 e 12m de altura, e algumas com 15 a 18m); médio, com arbustos mais ou menos densos, que podem atingir até 3m de altura; e inferior, com número reduzido de espécies, com menor altura (GUIMARÃES *et al.*, 2006).

O Campo Cerrado corresponde a um tipo de vegetação baixa a média, exibindo um conjunto herbáceo-graminoso, com subarbustos e arbustos bem espaçados. Exemplos: capim-flecha (*Tristachya leiostachya*), canela-de-ema (*Vellozia Squamata Pohl*), murici (*Byrsonima crassifolia - L.- Rich*), pitanga vermelha (*Eugenia calycina*) (MOYSÉS, 2008). O dossel do Campo Cerrado é bem espalhado, com média de 10% de cobertura. Algumas espécies atingem, excepcionalmente, 10m de altura, como a gomeira (*Vochysia thyrsoidea*). Ocasionalmente, ocorre em alta densidade de herbáceas, com destaque para as gramíneas (GUIMARÃES *et al.*, 2006).

As áreas com pastagens naturais possuem espécies mais adaptadas ao ambiente, e estão localizadas principalmente em regiões de difícil acesso, próximas as intermediações da Serra da Mesa. As pastagens naturais apresentam um modelo de distribuição associado às condições edafoclimáticas locais (i.e., dependendo do solo e da disponibilidade hídrica). E ocorre em baixíssimas proporções, representando menos de 1% da vegetação da bacia, próxima à Serra Dourada, em regiões de difícil acesso, solos com elevada pedregosidade e relevo íngreme. Os municípios da BHRV que apresentam maiores proporções de pastagens naturais são Goiás (33%) e Faina (15%)(SANTOS, 2014).

Quanto à variabilidade das condicionantes climáticas, a BHRV apresenta igual característica climática do Estado, caracterizada como de clima tropical semiúmido, com dois períodos pluviométricos distintos: seco (maio a setembro) e chuvoso (outono a abril). O mês de janeiro geralmente apresenta grande descarga pluvial na bacia, com registros de até 335 mm (SANTOS e FERREIRA, 2017).

No caso específico da BHRV, Vieira *et al.* (2014) afirmam que uma das principais características do clima é a presença de altas temperaturas ao longo do ano, com médias mensais variando de 23 a 28 °C (com temperaturas mínimas e máximas de 20 e 32 °C, respectivamente). Há precipitações habituais e excepcionais, sendo que as precipitações excepcionais são aquelas caracterizadas como intensas e localizadas, capazes de saturar os solos e provocar grande volume d'água nos rios. Como exemplo, destaca-se a marcante

enchente no rio Vermelho (município de Goiás) em dezembro de 2001. Além disso, a precipitação durante o período chuvoso pode ser irregular, podendo ocorrer dias de chuva intensa, intercalados com períodos curtos de estiagem (Veranico).

As características naturais associadas ao processo acelerado de colonização/ocupação da região, em meados dos anos de 1970 e 1980, provocaram uma série de mudanças nas configurações originárias da BHRV (VIEIRA, 2016). O viés produtivo regional enquadra-se principalmente na pecuária bovina (ocupando mais de 53% da bacia), agricultura mecanizada (com áreas de sequeiro e irrigadas) e, em determinadas partes, na produção de mantimentos de subsistência (SANTOS, 2014).

Essa condição socioeconômica e ambiental é subsidiada por aspectos físico-bióticos essenciais, que caracterizam o aporte básico do sistema produtivo, dentre eles, as características climográficas, pedológicas (predominância de classes pedológicas dos Latossolos e Argissolos), climáticas (com boa distribuição pluviométrica), associados com incrementos tecnológico-financeiros dos produtores da região.

3.2 – Procedimentos Metodológicos

A estimativa espaço-temporal da produtividade primária bruta (GPP) envolveu uma série de procedimentos metodológicos, quando se usa as técnicas de Sensoriamento Remoto. Através desses procedimentos, foram estimados e analisados parâmetros biofísicos como GPP, saldo de radiação (R_n) e evapotranspiração real (ETR), bem como estimativas de biomassa seca e unidade animal (UA), para outubro de 2014 a setembro de 2015 na BHRV com a aplicação do modelo CASA-SEBAL e uma adaptação da metodologia do MOD17 aplicada nas imagens do Landsat 8 OLI/TIRS. A estimativa destes parâmetros com imagens de média resolução espacial como a do Landsat 8 OLI/TIRS, possibilita uma análise mais detalhada da variabilidade espacial deste parâmetros, auxiliando em uma tomada de decisão em escala local.

No Estado de Goiás, foram analisadas a variação espacial e temporal da biomassa seca e Unidade Animal - UA para o ano de 2014, através da estimativa da GPP (posteriormente convertida em Biomassa Seca) com imagens do sensor MODIS produto MOD13Q1H, com resolução espacial de 250 metros, no qual buscou-se um melhoramento do produto MOD17A2H para as áreas de pastagem do cerrado goiano. Este melhoramento está relacionado aos dados de calibração do modelo, sendo que neste utilizou-se parâmetros climáticos locais e dados biofísicos específicos para a pastagem *Brachiaria Brizanta*. Além

disso, esta estimativa apresenta melhoria em relação à resolução espacial, pois no produto MOD17A2H esta é de 500 metros e com esta metodologia é de 250 metros (MOD13Q1H).

3.2.1 – Base de Dados Cartográficas

Com base no exposto, foram utilizadas as seguintes bases cartográficas, com o objetivo de calcular as variáveis para as áreas de estudo.

- Imagens MOD13Q1H do sensor MODIS para o Estado de Goiás, disponibilizadas pelo Serviço Geológico Norte-Americano (USGS) e pelo portal do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG/UFG.
- Imagens do MOD17A2H do sensor MODIS para o Estado de Goiás e BHRV, disponibilizadas pelo Serviço Geológico Norte-Americano (USGS).
- Imagens OLI/TIRS do satélite Landsat8 para a BHRV, disponibilizadas pelo Serviço Geológico Norte-Americano (USGS).
- Séries temporais de dados meteorológicos das estações meteorológicas disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para parametrização dos algoritmos.
- Dados de biomassa de pastagem na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho – BHRV, coleta dos pela equipe do LAPIG/UFG, para o período de outubro de 2014 a setembro de 2015.
- Mapeamento das áreas de pastagem, disponibilizado pelo LAPIG, para a Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho e para todo o Estado de Goiás.

3.2.2 – Áreas de Estudo Específicas (Propriedades Rurais)

Para melhor avaliação e caracterização das áreas de pastagens na BHRV, foram selecionadas cinco propriedades rurais com pastos de *Brachiaria brizantha*, considerados de boa qualidade, os quais estão localizados em diferentes unidades geoambientais (solo e relevo), sendo que quatro propriedades estão no município de Goiás (Faz. Dois Córregos, Faz. Estância Paraíso, Faz. N. Sr.^a das Graças e Faz. Jatobá) e uma no município de Britânia (Faz. Ajuricaba). Na Figura 7 é indicada a localização dos pontos de coleta de dados nas cinco propriedades elencadas para o trabalho de campo. A Figura 8 traz o registro das paisagens encontradas nas propriedades rurais visitadas, onde foram coletadas as amostras de pastagem.

Figura 07 – Localização da BHRV no estado de Goiás e das cinco propriedades rurais visitadas nas doze campanhas de campo (outubro de 2014 a setembro de 2015)



Fonte: LAPIG (2016).

Figura 08 – Paisagem típica nas 5 propriedades na BHRV selecionadas neste estudo.



Faz. Ajuricaba



Faz. Estância Paraíso



Faz. Jatobá



Faz. N. Sr.ª. Das Graças



Faz. Dois Córregos

Fonte: LAPIG (2016).

Os critérios de seleção adotados compreendem a presença de propriedades em diferentes unidades geoambientais da BHRV (Vieira, 2013; Santos, 2014), tal como ocorre com a propriedade Dois Córregos, inserida na alta porção da bacia, com solos rasos e uma vegetação de Cerradão, ou a propriedade Nossa Senhora das Graças, na média porção da bacia, com Latossolo e terrenos mais planos (solos mais profundos). Outro fator considerado foi a logística de acesso às propriedades, garantindo sempre que possível um fácil acesso às

mesmas por rodovias pavimentadas ou próximas destas. Tais condições otimizaram a atividade de campo, em geral realizada em apenas dois dias para cada campanha.

3.2.3 – Instrumentos de Campo

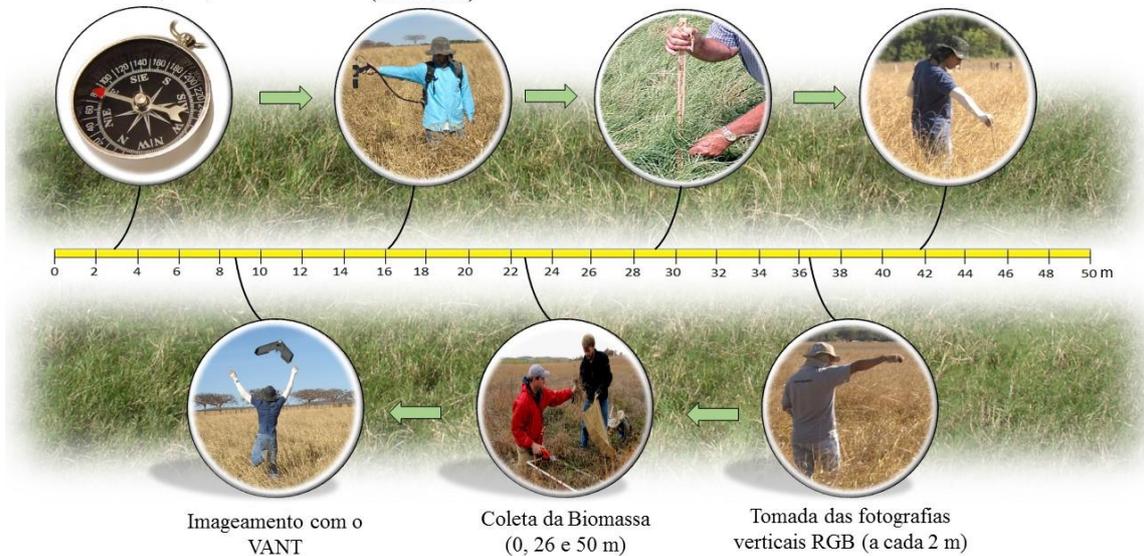
Os dados de campo foram coletados por uma equipe multidisciplinar do LAPIG utilizou uma trena de 50 m (implantação do transecto), trena de 3 m (medição da altura da pastagem), pin-point (amostragem dos alvos), espectrorradiômetro (modelo SM-3500 - marca Spectral Evolution), para coleta das assinaturas espectrais das amostras de pastagem; câmera fotográfica (padrão RGB), para a tomada das fotografias verticais da pastagem; Veículo Aéreo Não Tripulado, modelo Swinglet CAM - marca SenseFly, utilizado no imageamento da área de estudo e acompanhamento de algumas pastagens ao longo do ano. Para a coleta da biomassa foram utilizados facão e tesoura de jardinagem, e sacos de nylon para armazenagem do material (FERREIRA *et al.*, 2016).

3.2.4 – Procedimentos de Campo e Laboratoriais

Durante o período de outubro de 2014 a setembro de 2015, foram realizadas doze campanhas de campo, com datas coincidentes com a passagem do satélite Landsat 8OLI/TIRS na BHRV (Tabela 03).

Em cada propriedade visitada (dentre as cinco selecionadas) em cada campanha, foi determinada uma direção com uma bússola (azimute de 180°), implantado um transecto de 50 m rente à pastagem, com coleta de dados a cada 2 metros (26 coletas por transecto). Convencionou-se coletar os dados na seguinte ordem: uso do espectrorradiômetro com uma lente de 8° e a uma altura média de 1,4 m, medição da altura da pastagem com uma trena, amostragem dos alvos (solo, rocha ou vegetação) com o pin-pointe a tomada de fotografias verticais, a uma altura média de 1,4 m. Posteriormente, foi feita a coleta da biomassa em três pontos do transecto (0 m, 26 m e 50 m), separada em biomassa verde e seca, e armazenada em sacos para a análise no laboratório. Por último, para três propriedades, foi realizado o imageamento da área de estudo com o VANT, assegurando-se uma resolução espacial de 10 cm por pixel. Todas as etapas estão ilustradas na Figura 9.

Figura 09 - Etapas do procedimento de coleta dos dados em campo, com os referidos instrumentos. Determinação da direção de 180° e implantação do transecto (50 m) Coleta de dados com o espectrorradiômetro (a cada 2 m) Medição da altura da pastagem (a cada 2 m) Amostragem dos alvos com pinpoint (a cada 2 m)

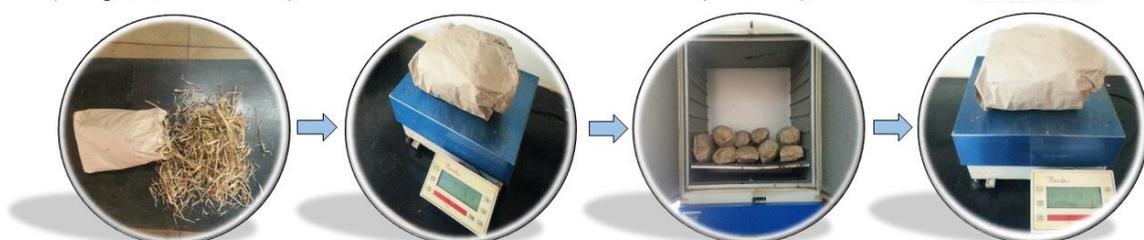


Fonte: LAPIG, 2016.

3.2.5 – Análise de Laboratório e Caracterização Radiométrica das Pastagens na BHRV

Em laboratório, procedeu-se com a pesagem, secagem e nova pesagem das biomassas verde e seca. Inicialmente, a biomassa coletada em campo foi pesada e colocada para secar em estufa em temperatura de 70°C, por aproximadamente 72 horas; após essa etapa, a matéria seca foi pesada novamente para que fosse possível avaliar a perda de água. As informações foram organizadas em tabelas e os valores foram convertidos de g/m². Estas etapas compreendidas na secagem e pesagem da biomassa (verde e seca) estão ilustradas na Figura 10.

Figura 10 – Etapas do procedimento de secagem e pesagem das amostras de biomassa verde e seca. Separação das amostras (exemplares verdes e secos) Pesagem dos volumes Secagem na estufa a 70°C (2 ou 3 dias) Pesagem dos volumes secos

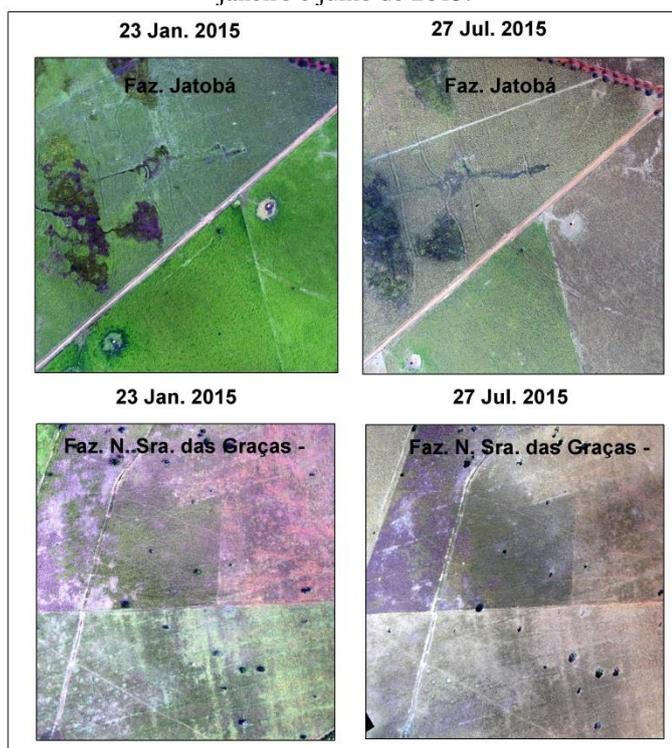


Fonte: LAPIG (2016).

Um dos métodos de avaliação mais detalhada das áreas de pastagens utilizados nesta pesquisa, de caráter estritamente qualitativo, refere-se aos vôos sistemáticos realizados com o

Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) sobre três das cinco propriedades. O uso do VANT, como parte deste protocolo de campo, é voltado para uma caracterização da área de estudo em alto detalhe, favorecendo a localização de pontos de controle, coleta de amostras e percepção das diferenças aparentes entre os pastos avaliados, ao longo do tempo. A Figura 11 traz uma comparação temporal entre alguns sobrevôos com o VANT, onde é possível observar a diferença de comportamento do pasto entre os meses de janeiro (auge da estação chuvosa) e julho (auge da estação seca), com pastagens mais verdes em janeiro e mais secas em julho (Figura 11). A diferença no padrão de textura e cor é maior na Faz. Jatobá se comparada à Faz. N. Sra. das Graças. Isto ocorre porque o solo da Faz. N. Sra. das Graças é um Latossolo Vermelho-Escuro, sendo mais profundo e bem drenado, o que favorece a infiltração da água para camadas mais profundas. Já na Faz. Jatobá o solo é um Cambissolo, mais raso e jovem, onde a água infiltra e se mantém nas camadas mais superficiais favorecendo a atividade fotossintética da pastagem, e aumentando a biomassa verde.

Figura 11 – Exemplos de vôos com VANT realizados nas Fazendas Jatobá e N. Sra. Das Graças em janeiro, em janeiro e julho de 2015.



Fonte: LAPIG (2015).

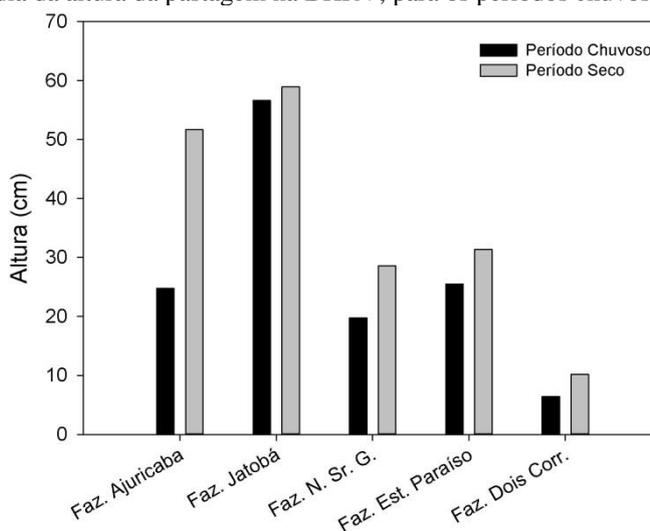
Outra variável importante e correlacionada com a produtividade é a altura do pasto, medida com uma trena durante as campanhas de campo, a cada dois metros ao longo do transecto. A Faz. Jatobá apresenta pastagens quase duas vezes mais altas (56 e 59 cm) que as demais propriedades (em torno de 30 cm) e uma diferença mínima na altura entre os períodos

chuvoso e seco (de apenas 4 cm), indicando que nesta propriedade há uma lotação adequada, evitando o superpastejo e a morte prematura da gramínea (*Brachiaria*). Esta fazenda possui o melhor manejo, possibilitando que o gado tenha acesso à boa forragem o ano todo, mesmo na estação seca.

A Faz. Ajuricaba apresenta a maior diferença na altura do pasto entre os dois períodos, com pastos duas vezes mais altos no período chuvoso (52 cm), se comparado ao período seco (25 cm). O solo nesta propriedade, por ser um Plintossolo, caracterizado pela presença de crostas, dificulta a infiltração da água e leva ao encharcamento no período chuvoso, favorecendo o crescimento da *Brachiaria* no período seco.

As fazendas N. Sra. das Graças e Estância Paraíso apresentam valores de altura muito próximos tanto no período chuvoso (19 e 25 cm) como no seco (29 e 31 cm), o que indica condições ambientais e de manejo semelhantes. A Faz. Dois Córregos apresenta as menores alturas de pastagem, com 6 cm no período chuvoso e 10 cm no seco, com solos bastante rasos e pedregosos, o que dificulta o desenvolvimento da *Brachiaria*, associado a um manejo inadequado, o que leva a uma ocorrência de pastagens de baixa altura e, conforme as figuras 3 e 4, com pouca biomassa. A Figura 12 apresenta as alturas médias do pasto no período analisado, e evidencia que o tipo de solo pode ser um fator importante na produtividade do pasto, visto que solos com capacidade de reter água por mais tempo mantêm sua produtividade primária bruta, mesmo no período de estiagem.

Figura 12 – Média da altura da pastagem na BHRV, para os períodos chuvoso e seco.



Fonte: LAPIG (2015).

Quanto aos dados do espectrorradiômetro (lente de 8° a 1,40 m do solo), os intervalos do azul, verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas foram demarcados segundo os intervalos das bandas do satélite Landsat 8, sensor OLI. Para cada assinatura espectral, foi calculada a média dos intervalos do vermelho e infravermelho próximo para o cálculo do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (ROUSE *et al.*, 1973), conforme a seguinte expressão.

$$NDVI = \frac{\text{Infravermelho}_{\text{próximo}} - \text{Vermelho}}{\text{Infravermelho}_{\text{próximo}} + \text{Vermelho}} \quad (05)$$

Todas as assinaturas espectrais da pastagem apresentam o comportamento espectral típico da vegetação, no qual os pigmentos nas folhas (carotenos e clorofila) absorvem a radiação eletromagnética (REM) no intervalo do azul (430-450 nm) e vermelho (650-670 nm), comprimentos de ondas mais curtos, com maior energia, denominados de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), os quais refletem muita REM no intervalo do infravermelho próximo (NIR), sendo que esta radiação não é utilizada na fotossíntese (Figura 13).

Nas assinaturas espectrais percebe-se “dois buracos” correspondentes às janelas atmosféricas (cerca de 1400-1500 e 1900-2000 nm), onde há total absorção da REM pela água (Figura 13). Nota-se também a presença de ruídos nos dois gráficos entre 1750 e 1900 nm, com interferência da estação seca, entre 2300 – 2500nm, e da estação chuvosa, acima de 2000nm, resultado da presença de umidade na atmosfera.

As assinaturas espectrais das pastagens mostram maior reflectância na estação chuvosa, comparativamente à estação seca, devido ao valor de irradiância utilizado, de TOA (Topo da Atmosfera), e o qual desconsidera a presença de nuvens (responsáveis por reduzir a radiação solar que chega na superfície) e, conseqüentemente, a radiância; assim, a razão irradiância e radiância é maior do que no seco. A diferença na reflectância dos pastos das cinco propriedades nas estações seca e chuvosa é maior nos maiores comprimentos de onda, em particular no infravermelho próximo, variando no azul de 3 a 5% (seco) e de 3 a 7% (chuvoso), e no infravermelho próximo de 24 a 35% (seco) e de 32 a 51% (chuvoso), respectivamente.

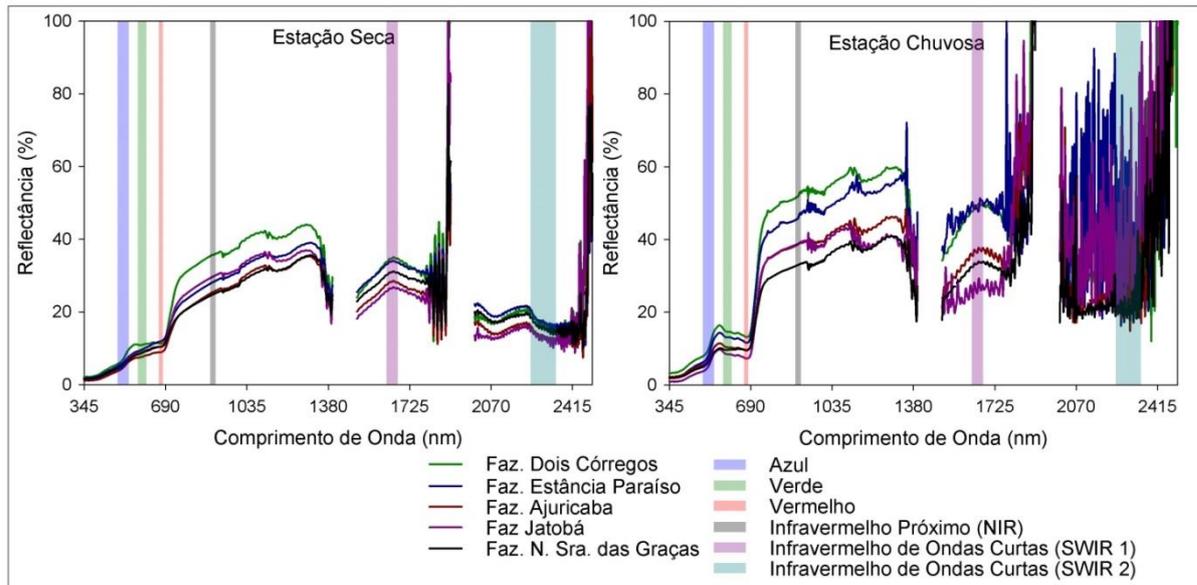
A vegetação sadia reflete bastante no NIR (40 a 60%), sendo que quanto maior o número de camadas de folhas (presença de vegetação arbustiva e arbórea), maior a

reflectância no NIR, pois isto leva a energia que foi transmitida através das folhas a ser refletida, somando a energia refletida inicialmente. Em termos de pastagem, a maior reflectância no NIR pode indicar pastagens com presença de vegetação arbustiva e arbórea, podendo indicar um pasto sobre o processo de degradação agrícola. Na seca, algumas folhas da pastagem morrem caindo sobre o solo de forma horizontal, minimizando a ocorrência de tufos de pastagem, e reduzindo a diferença na cobertura da pastagem entre as propriedades.

A REM no visível (intervalos indo do azul ao vermelho) mostra valores de reflectância baixos e próximos para todos os pastos na estação seca, com valores no azul e vermelho semelhantes ao valor do verde, indicativos da baixa atividade fotossintética das pastagens. Já na estação chuvosa, nota-se a prevalência da absorção nos intervalos do azul e vermelho e a menor absorção no verde, indicando a maior atividade fotossintética das pastagens. Na estação seca, a maior reflectância no vermelho indica tanto pastos com muito solo exposto, como pastos secos (baixa atividade fotossintética); no período chuvoso, devido à alta atividade fotossintética das pastagens (alta absorção nos intervalos do vermelho e azul), a maior reflectância no vermelho é indicativo da presença de solo exposto.

Na seca, a maior reflectância no vermelho, com valores quase idênticos, ocorreu para as Fazendas Dois Córregos, Estância Paraíso, Jatobá e N. Sra. das Graças. Isto se deve ao fato das pastagens estarem predominantemente secas. No período chuvoso, há uma diferença na reflectância do vermelho entre as propriedades, sendo um indicativo da presença de solo exposto, com maior reflectância para a Faz. Dois Córregos, seguido da Faz. Estância Paraíso, Faz. Ajuricaba e Nossa Sra. das Graças e a Faz. Jatobá.

Figura 13 – Média das assinaturas espectrais das pastagens para os períodos seco e chuvoso



Fonte: LAPIG (2015).

Os valores de NDVI para as estações seca e chuvosa foram muito próximos entre todas as propriedades variando de 0,4 a 0,5 na seca, e até 0,53 a 0,66 na chuva. Na seca há maior diferença nos valores de NDVI entre as pastagens, com os maiores valores para a Faz. Dois Córregos(0,5), seguida da Faz. Jatobá (0,47), da Faz. Ajuricaba (0,47), da Faz. N. Sra. das Graças (0,4) e da Faz. Estância Paraíso (0,4). A porcentagem de verde apresentou o mesmo padrão, com a maior porcentagem de verde para a Faz. Dois Córregos (31%), seguida da Faz. Ajuricaba (27%), da Faz. Jatobá (20%), da Faz. N. Sra. das Graças (15%) e da Faz. Estância Paraíso (14%). Os altos valores de NDVI e porcentagem de verde para a Faz. Dois Córregos no período seco indica a presença de espécies invasoras no pasto e não de uma pastagem mais produtiva, como mostrado nos gráficos de altura e biomassa. Esta propriedade é seguida pela Faz. Jatobá e Ajuricaba, sendo que a primeira é caracterizada como uma pastagem produtiva, e a segunda apresenta altos valores de biomassa na seca, devido a maior quantidade de biomassa verde no período chuvoso, resultante do tipo de solo desta propriedade.

Na chuva, o maior valor foi para a Faz. Jatobá (0,66), seguido da Faz. Ajuricaba (0,59), Estância Paraíso (0,58), Faz. Dois Córregos (0,58) e N. Sra. das Graças (0,53). Na estação chuvosa há maior variação na resposta entre as propriedades com relação ao NDVI, mas nota-se que a propriedade com pastagem mais produtiva (Faz. Jatobá) tem a maior NDVI.

3.2.6 – Processamento Digital das Imagens Landsat 8OLI/TIRS (SEBAL/CASA)

A estimativa da GPP acima do solo, obtida por meio de sensoriamento remoto, pode ser feita ao combinar o modelo de estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação - APAR (proposto por MONTEITH, 1972), juntamente com o modelo de eficiência do uso da luz na fotossíntese (proposto por FIELD *et al.*, 1995). Bastiaanssen e Ali (2003) consideram que o fator água do modelo de Field *et al.* (1995) pode ser representado pela fração evaporativa, que integra o conjunto de procedimentos do algoritmo SEBAL, com objetivo de estimar a evapotranspiração através da quantificação dos componentes do balanço de energia. Assim, foram processadas para a área da BHRV as imagens OLI/TIRS - Landsat 8, correspondentes à órbita 222 ponto 71, referentes às datas apresentadas na Tabela 03.

Tabela 03 – Datas da passagem do satélite e datas da coleta das amostras de pastagem.

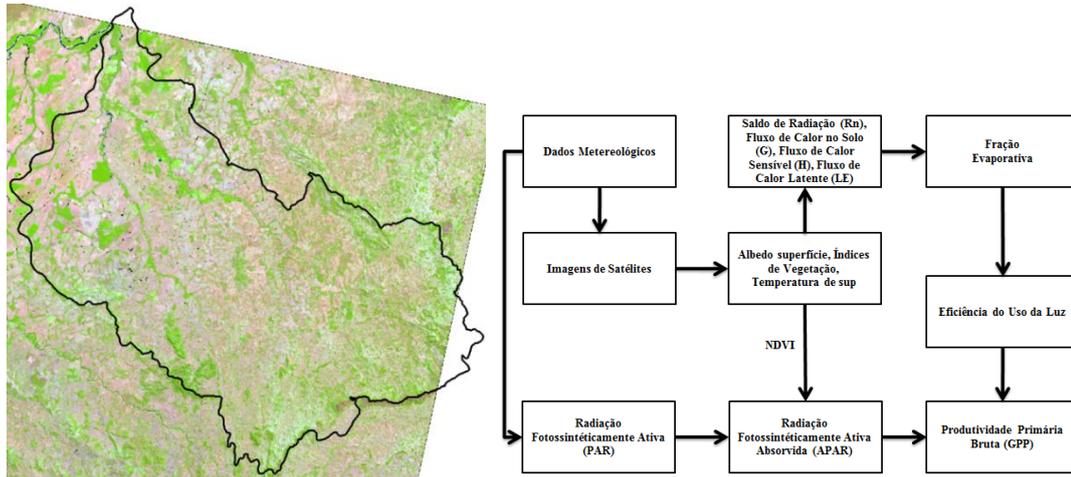
Ano	Data de coleta	Data de Passagem do Satélite
2014	02/out	02/out
2014	09/Nov	03/Nov
2014	14/dez	21/dez
2015	23/jan	22/jan
2015	16/fev	07/fev
2015	15/mar	11/mar
2015	12/abr	12/abr
2015	24/mai	30/mai
2015	21/jun	15/jun
2015	27/jul	17/jul
2015	14/ago	11/ago
2015	06/set	03/set

Fonte: LAPIG (2016).

Devido à quantidade de nuvens sobre a área de estudo, foram selecionadas as imagens com menor contaminação atmosférica, sendo processadas as imagens obtidas nos dias 18 de outubro de 2014, 06 de janeiro, 23 de fevereiro, 12 de abril, 30 de maio, 15 de junho, 17 de julho, 18 de agosto e 03 de setembro de 2015. Além destas imagens, foram utilizados os dados meteorológicos da estação automática de Goiás - GO (A014), localizada na BHRV, mais especificamente na cidade de Goiás, sob a responsabilidade do Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET). A Figura 14 demonstra as etapas do processamento das imagens Landsat 8 OLI/TIRS.

Figura 14 – (a) Imagem OLI/TIRS do satélite Landsat 8 sobreposta pelo limite vetorial da bacia hidrográfica do rio Vermelho, na composição 6R 5G 4B; (b) fluxograma do algoritmo SEBAL acoplado ao CASA.



Fonte: autor (2017).

Para a obtenção da GPP, por meio do acoplamento do algoritmo CASA no SEBAL, foram utilizados os seguintes dados meteorológicos: temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global, velocidade do vento e pressão atmosférica. No algoritmo SEBAL, utilizou-se a equação do balanço de energia para a estimativa do fluxo de calor latente (LE) como resíduo dos demais componentes (Fluxo de calor no Solo (G), fluxo de calor sensível (H) e o saldo de radiação (Rn)), conforme a equação 06.

$$LE = Rn - H - G \quad (06)$$

De posse dos componentes do balanço de energia, foi estimada a fração evaporativa, com base na equação 07.

$$FE = \frac{LE}{(Rn - G)} \quad (07)$$

Detalhes da estimativa dos componentes do balanço de radiação e balanço de energia podem ser consultados no Apêndice I. A fração evaporativa foi utilizada para a estimativa da GPP, por meio da metodologia proposta por Bastiaanssen e Ali (2003), sendo estimada

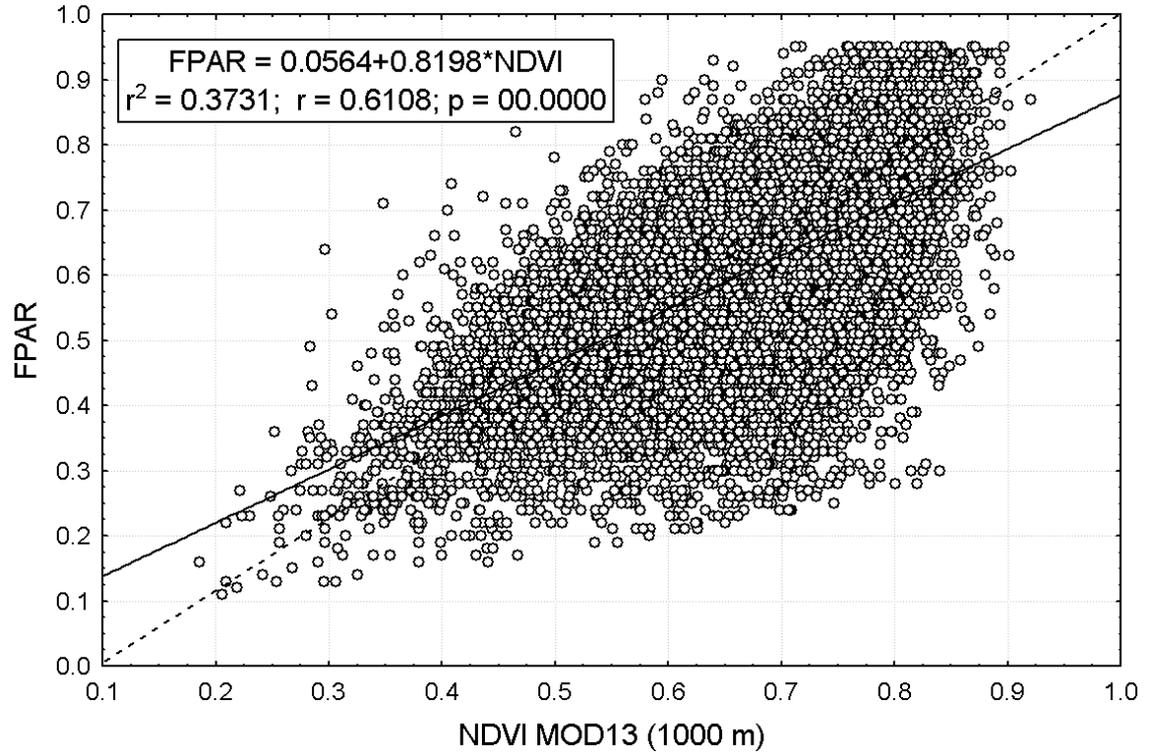
primeiramente a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR, em Wm^{-2}). Para a estimativa de PAR, foi adotado como fator de aproveitamento da luz solar o valor de 0,58. Na literatura especializada, estima-se que a fração de PAR utilizada pela vegetação em seu processo de fotossíntese seja da ordem de aproximadamente 50%. Estudos realizados por Galvani (2009) indicam razões entre 44% e 69%; em quanto que Silva *et al.* (2013) apontaram que, para a região de Cerrado, o valor de radiação fotossinteticamente ativa representa 58% da radiação global, aplicável para as estações seca e chuvosa. Estes autores utilizaram os dados do Projeto SONDA para a realização da pesquisa. Por este razão, adotou-se nesta pesquisa a utilização do mesmo fator de aproveitamento (i.e., 58%) obtido por Silva *et al.* (2013). Dessa forma, a PAR foi calculada conforme a equação 08.

$$PAR = 0,58 * R_{solar} \quad (08)$$

Por sua vez, sabe-se que somente uma parte da radiação fotossinteticamente ativa é absorvida pela vegetação - APAR, encontrada no intervalo do espectro de luz visível entre 0,4 e 0,7 μm . Diversos estudos vêm demonstrando uma alta relação entre a FPAR e os índices de vegetação, como o NDVI (SELLERS *et al.*, 1992; POTTER *et al.*, 1993; SELLERS *et al.*, 1997; DEFRIES *et al.*, 1997; FRIEDL, 1997; DEFRIES e Los, 1999; GOETZ *et al.*, 1999). Esta relação foi observada em áreas de floresta tropical em Sumatra (GUILLEVIC e GASTELLU-ETCHEGORRY, 1999). Portanto, para a estimativa da FPAR desta pesquisa, foi realizada a correlação entre a FPAR e o NDVI em áreas de pastagens, no intervalo do ano de 2014, utilizando os produtos MOD13Q1H (NDVI) e o MOD15A2 (FPAR). Os coeficientes obtidos nesta relação foram utilizados na estimativa da FPAR com as imagens de NDVI do Landsat 8 OLI/TIRS na BHRV e nas imagens do MOD13Q1H para as áreas de pastagens do cerrado goiano. As Figuras 15 e 16 mostram o resultado para o período chuvoso e de estiagem.

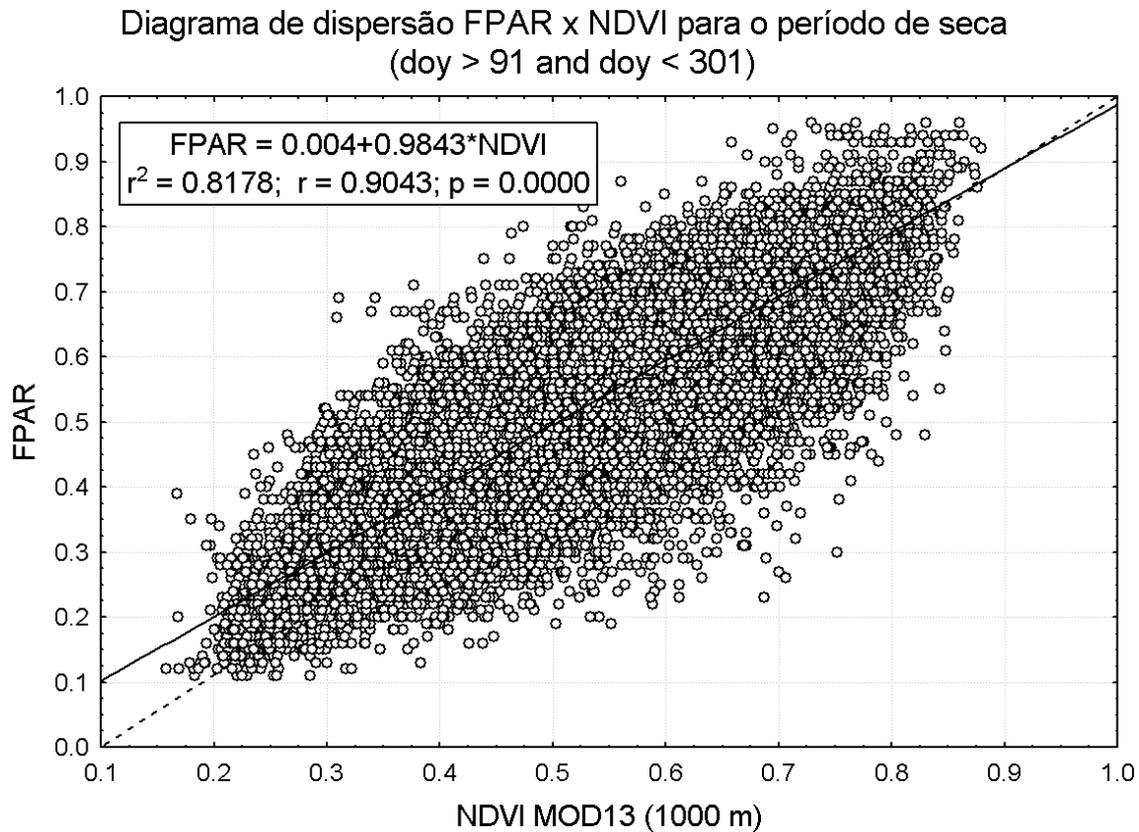
Figura 15 – Correlação entre o NDVI e o FPAR para o período chuvoso em áreas de pastagem no Estado de Goiás.

Diagrama de dispersão FPAR x NDVI para o período de chuva
(doy < 91 or doy > 301)



Fonte: autor (2018).

Figura 16 – Correlação entre o NDVI e o FPAR para o período de estiagem em áreas de pastagem no Estado de Goiás.



O coeficiente de correlação para o período chuvoso foi de $r = 0,6108$ e valor $p >$ que $0,0001$. Este resultado está associado à interferência da atmosfera, que no caso das imagens do MOD13Q1 e MOD15A2, mesmo com os filtros de qualidade dos pixels (para evitar nuvens) apresentam muitos ruídos neste período. Para o período de estiagem, onde há pouca interferência da atmosfera, os valores de NDVI e FPAR apresentaram alta correlação, obtendo valores do coeficiente de determinação de $0,8178$ e $p > 0,0001$, demonstrando a viabilidade de se estimar a FPAR com as imagens de NDVI. Dessa forma, a FPAR para a pastagem pode ser estimada em função do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), conforme equação 09, para o período chuvoso, e equação 10 para o período de estiagem.

$$\text{FPAR} = 0,0564 + 0,8198 * \text{NDVI} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (09)$$

$$\text{FPAR} = 0,004 + 0,9843 * \text{NDVI} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (10)$$

Portanto, a estimativa da APAR consiste entre o produto da PAR e FPAR, conforme equação 11.

$$APAR = FPAR \cdot PAR \quad (11)$$

Em seguida, foram realizados os cálculos dos escalonares de temperatura T1 e T2, dados pelas equações 12 e 13 (FIELD *et al.*, 1995).

$$T_1 = 0,8 + 0,02T_{opt} - 0,0005T_{opt}^2 \quad (12)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2T_{opt} - 10 - T_{dia})} \cdot \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{dia})]} \quad (13)$$

Onde: T_{opt} é a temperatura do ar média (°C) do mês de máximo NVDI e T_{dia} é a temperatura do ar média diária (°C). A eficiência do uso da luz - ε (g C MJ⁻¹) pode ser quantificada pelo modelo de Field *et al.*, (1995), modificada por Bastiaanssen e Ali (2003), conforme a equação 14.

$$\varepsilon = \varepsilon' \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot FE \quad (14)$$

Onde: ε' representa eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa ou comumente denominada de uso da luz, sendo considerado nesta pesquisa com valor igual a 0,5 g C MJ⁻¹. Estudos realizados por Rosa e Sano (2013) em áreas de pastagens *Brachiaria brizantha* no cerrado mineiro encontraram valores de eficiência máxima na ordem de 0,46 g C MJ⁻¹, Fonseca *et al.*, (2006) encontraram valores e eficiência de utilização da radiação variando de 0,09 a 0,51 g/MJ em experimentos de campo, para vegetação campestre, no Bioma, Campos Sulinos. Machado (2014), em experimento desenvolvido com pastagem *Brachiaria brizantha* na unidade da Embrapa Cerrados, em Planaltina – DF, encontrou valores de eficiência máxima de 0,5 g C MJ⁻¹. Neste sentido optou-se por utilizar esse fator de eficiência obtido por Machado (2014) nesta pesquisa. Com a determinação da ε , obteve-se a GPP em g C m⁻² dia⁻¹, com base na equação 15.

$$GPP = APAR \cdot \varepsilon' \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot FE \quad (15)$$

Para a conversão de GPP em biomassa seca, considerou-se o fator de conversão do carbono em biomassa igual a 2,7. Esta relação entre biomassa seca e carbono foi encontrada em uma pesquisa realizada por Neumann Cosel *et al.* (2011), na pastagem de espécie *Brachiaria Brizanta*, sendo a mais comum no Cerrado. Portanto, a estimativa da biomassa seca com base nas imagens de GPP para a pastagem é obtida de acordo com a equação 16.

$$\text{Biomassa seca} = \text{GPP} * 2,7 \quad (16)$$

3.3 – Processamento das Imagens MODIS - Produto GPP Pastagem no Cerrado Goiano

Os dados obtidos pelo sistema Terra/MODIS (coordenado pela NASA - *National Aeronautics and Space Administration*) produzem estimativas de GPP para toda a superfície terrestre, com resolução espacial de 0,5 km e temporal de 8 dias (RUNNING *et al.*, 2000; THORNTON *et al.*, 2002). Tais estimativas são geradas por um algoritmo que processa os dados de resolução moderada obtidas pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), abordo da plataforma orbital Terra, gerando os produtos MOD17A2/A3 (MOD17 User’s Guide, 2015). Para esta pesquisa, foi utilizado *otile* MODIS correspondente ao Estado de Goiás -H13V10 (Figura 17).

Figura 17 – Tile MODIS para o Bioma Cerrado

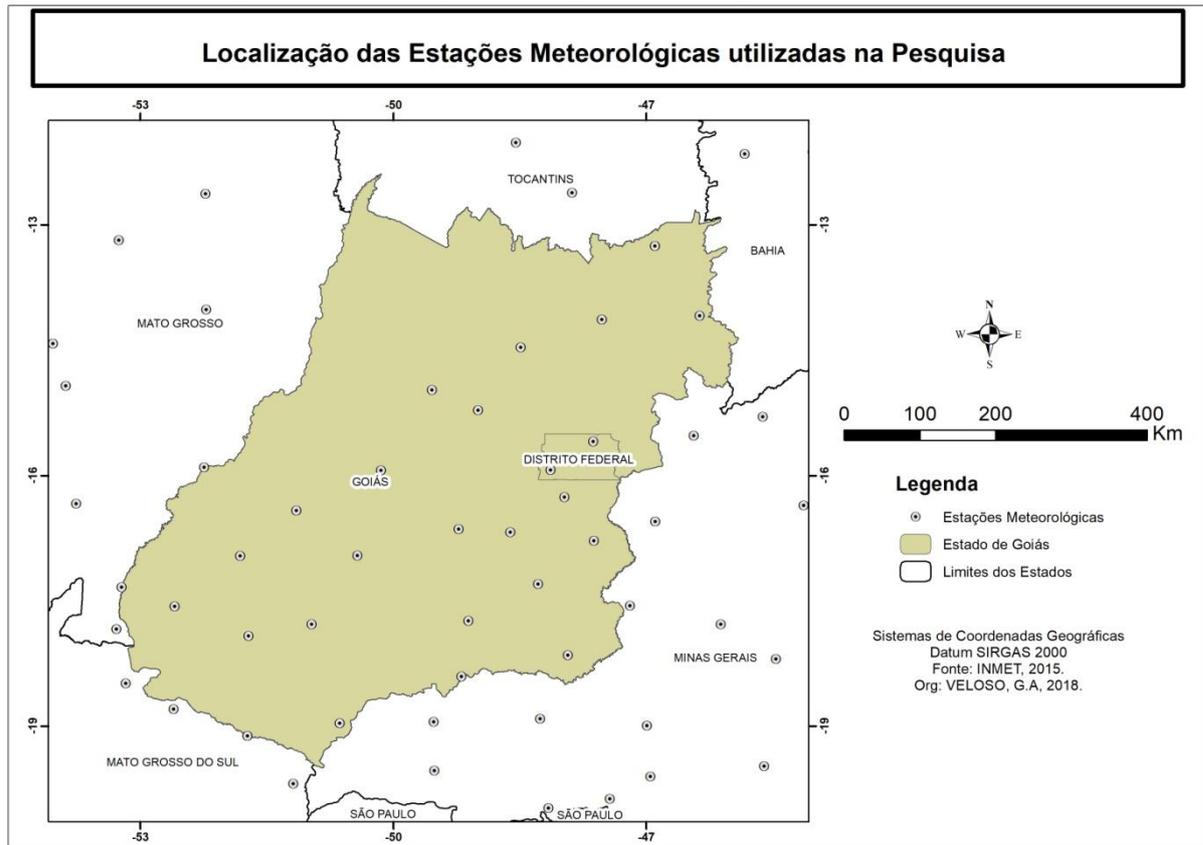


Fonte: LAPIG (2015).

Conforme anunciado nos objetivos desta pesquisa, buscou-se o aprimoramento da metodologia da NASA/MOD17 para áreas de pastagem no Estado de Goiás. Para isso, foi utilizado o ε_{\max} (eficiência máxima de conversão da radiação fotossinteticamente ativa) específica para pastagem *Brachiaria Brizanta*, considerada nesta pesquisa com valor igual a 0,5 g C MJ⁻¹. Portanto, a estimativa da eficiência do uso da luz (LUE) é calculada conforme a Equação 04, levando em consideração os fatores de atenuação, como temperatura do ar (Tmin Escalar) e déficit de pressão de vapor (VPD Escalar). A PAR foi obtida conforme a Equação 03, no entanto com o fator de aproveitamento da luz solar igual a 0,58, sendo este estimado para regiões do Cerrado, conforme explicado anteriormente.

As estimativas destes parâmetros foram geradas com base nos dados meteorológicos regionais (Figura 18), disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), visando uma calibração do modelo com parâmetros locais, tendo em vista que, para os produtos Terra/MOD17, os dados meteorológicos são de larga escala, com resolução de 1° por 1,25°. Outro objetivo desta etapa da pesquisa foi o de buscar um melhor detalhamento dos mapas da Produtividade Primária Bruta em áreas de pastagem, pois a resolução espacial do produto MOD17A2H, de 500 metros (resolução espacial original) em muitos os casos podem apresentar erros significativos devido à alta resolução, sobretudo em áreas de dinâmico uso do solo como no bioma cerrado. Portanto, a estimativa destes parâmetros com maior nível de detalhe para grandes áreas de pastagem no cerrado goiano, pode apresentar melhores resultados. Este maior nível de detalhe é obtido através da estimativa de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação – APAR, utilizando as imagens de NDVI do produto MOD13Q1H, com resolução espacial de 250 metros, como demonstrado pelas equações 09 e 10.

Figura 18 – Localização das Estações Meteorológicas no Bioma Cerrado



Fonte: INMET (2015).

Os dados climáticos foram interpolados pela técnica do inverso da potência da distância (do inglês - *Inverse Distance to a Power* - IDP). O IDP é um interpolador de média ponderada, de modo que a influência de um ponto em relação ao outro decresce com a distância. A ponderação é associada com o dado através do uso de uma potência de ponderação, que controla como o fator, *ponderação*, decresce para fora com a distância entre os pontos. O interpolador IDP é calculado pelas equações 17 e 18.

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (17)$$

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2} \quad (18)$$

Onde:

h_{ij} é a distância efetiva de separação entre o nodo grid j e o ponto vizinho i

\hat{Z}_j é o valor interpolado;

Z_i são os pontos vizinhos;

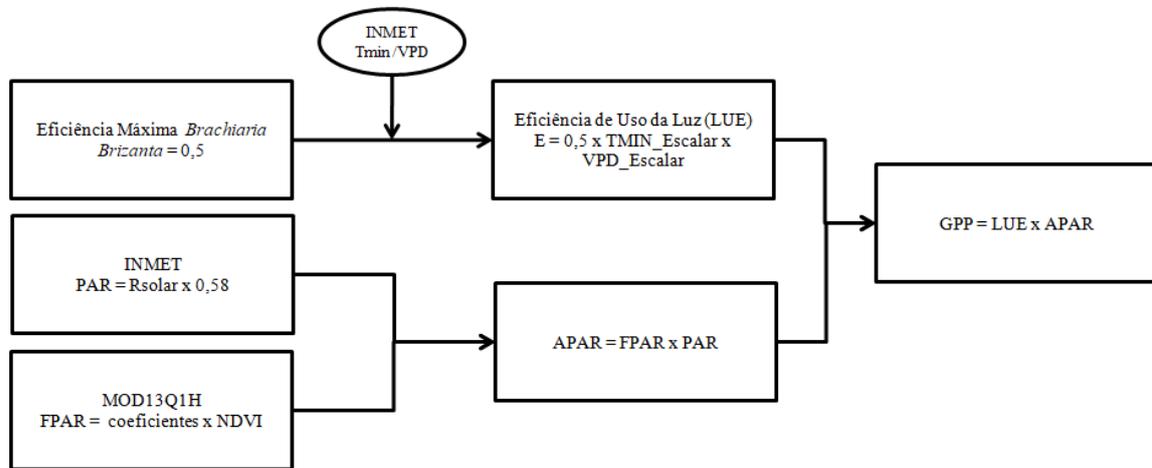
d_{ij}^2 é a distância entre os pontos;

β é a potência de ponderação (parâmetro de potência);

δ é o parâmetro suavizador.

Os dados diários de PAR e LUE observados nas estações foram interpolados, usando o coeficiente da potência β igual a 2,0 e de suavização δ igual a 1, sendo esse o mais utilizado na literatura. A Figura 19 apresenta a síntese da metodologia aplicada nesta pesquisa.

Figura 19 – Fluxograma da adaptação da metodologia MOD17A2H para Imagens do produto MOD13Q1H.



Fonte: autor (2018).

Para uma análise mais detalhada desta metodologia, a mesma foi aplicada nas imagens de NDVI do satélite Landsat 8 na BHRV. Convencionou-se chamar este produto de MOD17 (L8).

3.2.5 – Análises Estatísticas e Validação

Após a estimativa da GPP da pastagem por meio do modelo multiespectral, os valores estimados foram comparados com os dados obtidos em campo. Para validar os resultados, os dados de biomassa obtidos por esta técnica de modelagem para a BHRV foram comparados com os dados de campo coletados em cinco fazendas na BHRV (entre outubro de 2014 e outubro de 2015, pela equipe de campo do LAPIG). Foram realizadas análises de regressão linear entre os valores observados e estimados, além de análise dos erros, quantificando o erro absoluto médio (EAM) (Equação 19), a raiz do erro quadrático médio (REQM) (Equação 20) e o índice de concordância de Willmott (d) (Equação 21).

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_1 - X_2] \quad (19)$$

$$REQM = \left(\sum_{i=1}^N \frac{(X_1 - X_2)^2}{N} \right) \quad (20)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_1 - X_2)}{\sum_{i=1}^n (|X_1 - \bar{X}_2| + |X_1 - \bar{X}_2|)^2} \quad (21)$$

Onde: X_1 é o valor obtido em campo, X_2 o valor estimado pelo modelo padrão e X a média dos valores observados.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. – GPP Estimada com Modelo SEBAL/CASA e MOD17 (L8) para a BHRV

Este capítulo visa apresentar e discutir os resultados acerca da estimativa da GPP, estimada pelos modelos SEBAL/CASA (L8) e MOD17 (L8) em áreas de pastagem na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho, com imagens do satélite Landsat8, bem como apresentar os principais componentes do balanço de radiação e energia que influenciam no processo de conversão do carbono atmosférico em biomassa, como o saldo de radiação (R_n) e a evapotranspiração real (ETR). A análise desses parâmetros do balanço de radiação e balanço de energia se justifica pelo fato de serem bons indicadores da qualidade da pastagem. Além disso, serão apresentados posteriormente os dados da estimativa de biomassa seca nas pastagens do Estado de Goiás, com o aprimoramento da metodologia aplicada no produto MOD17A2H.

4.1.1 – Alguns Parâmetros de Calibração

Nesta etapa da pesquisa procurou-se estimar e avaliar a distribuição espaço temporal da GPP e biomassa seca em áreas de pastagens na BHRV utilizando os algoritmos SEBAL/CASA (L8) e MOD17 (L8), sendo este último uma adaptação da metodologia NASA/MOD17 para imagens do satélite Landsat 8, nos quais, para a calibração, foram empregados dados climáticas regionais (dados do INMET) e eficiência da conversão da radiação solar específica para a pastagem *Brachiaria Brizanta*. Esta adaptação trouxe melhoria na escala de análise e precisão (com parâmetros específicos da região).

Além disso, foram elaborados mapas temáticos de saldo de radiação – R_n e evapotranspiração real – ETR para os dias 18 de outubro de 2014, 06 de janeiro, 23 de fevereiro, 12 de abril, 30 de maio, 15 de junho, 17 de julho, 18 de agosto e 03 de setembro de 2015. A Tabela 04 traz os parâmetros de calibração do algoritmo para os dias estudados, correspondente à cena Landsat8 – OLI/TIRS, órbita 222/ponto 71.

Tabela 04 – Data das imagens do Landsat8 OLI/TIRS (Data), Hora local (Hora), ângulo de elevação do sol (E), cosseno do ângulo zenital Z, quadrado da distância terra-sol e seu valor médio (d_r), Transmitância atmosférica (Tsw).

Data	Hora	E	cosZ	d_r	Tsw
18/out	10:27:19	64,41	0,9019	1,0097	0,773
06/jan	10:27:08	60,36	0,8692	1,0328	0,740
23/fev	10:26:53	57,64	0,8447	1,0197	0,729
12/abr	10:26:27	51,72	0,7851	0,9939	0,720
30/mai	10:26:10	42,89	0,6807	0,9720	0,712
15/jun	10:26:22	41,30	0,6600	0,9683	0,712
17/jul	10:26:38	42,09	0,6704	0,9682	0,724
18/ago	10:26:49	48,32	0,7496	0,9774	0,747
03/set	10:26:53	52,82	0,7968	0,9848	0,763

Fonte: USGS e autor (2018).

A metodologia para a estimativa do Saldo de Radiação – Rn e evapotranspiração real - ETR diária estão descritas no Apêndice I.

4.2 – Saldo de Radiação em Áreas de Pastagens na BHRV

A radiação solar é o mais importante fator para os processos químicos, físicos e biológicos na superfície da Terra. Silva *et al.* (2005) destacam que o conhecimento do saldo de radiação é de grande relevância para o desenvolvimento de modelos de gerenciamento de recursos naturais, pois trata-se do processo responsável pelas trocas de calor e massa na troposfera no sistema solo-planta, sendo um parâmetro de grande importância na produtividade primária.

Os valores do saldo de radiação em áreas de pastagem foram calculados no momento da passagem do satélite em (W/m^2). Na Tabela 05 observam-se os valores estatísticos das cartas do saldo de radiação para as áreas de pastagens na BHRV nos dias estudados, sendo que os menores valores obtidos foram nos dias 15 de junho ($330W/m^2$) e 17 de julho ($305 W/m^2$), com os maiores valores nos dias 06 de janeiro ($825W/m^2$) e 23 de fevereiro ($790 W/m^2$). A variação dos valores médios no período estudado foi de $670 W/m^2$ e $413 W/m^2$, obtidos nos dias 06 de janeiro e 17 de julho, respectivamente.

Um dos elementos mais importantes para o saldo de radiação é o balanço de onda curta. Na análise dos mapas de saldo de radiação (Rn), apresentados na Figura 20, é possível identificar a sazonalidade da radiação solar incidente, pois, para os períodos do ano em que ocorre uma maior incidência de radiação solar, há maiores valores médios de saldo de radiação nas locais de estudo, como observado nos dias 06 de janeiro e 23 de fevereiro. Os

alvos com os menores valores de albedo (baixa reflectância) são os que têm uma menor perda de radiação de onda curta e, conseqüentemente, maior quantidade de radiação armazenada na superfície, elevando os valores do saldo radioativo.

Tabela 05 – Valores estatísticos das cartas do saldo de radiação (W/m^{-2}) nas áreas de pastagem na BHRV, para os dias estudados.

Dias	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
18/out	500	700	591	24,73
06/jan	510	825	670	37,89
23/fev	511	790	642	40,46
12/abr	480	690	585	23,33
30/mai	350	560	449	17,39
15/jun	330	495	431	18,04
17/jul	305	480	413	21,17
18/ago	350	570	443	28,95
03/set	360	600	463	33,96

Fonte: autor (2018).

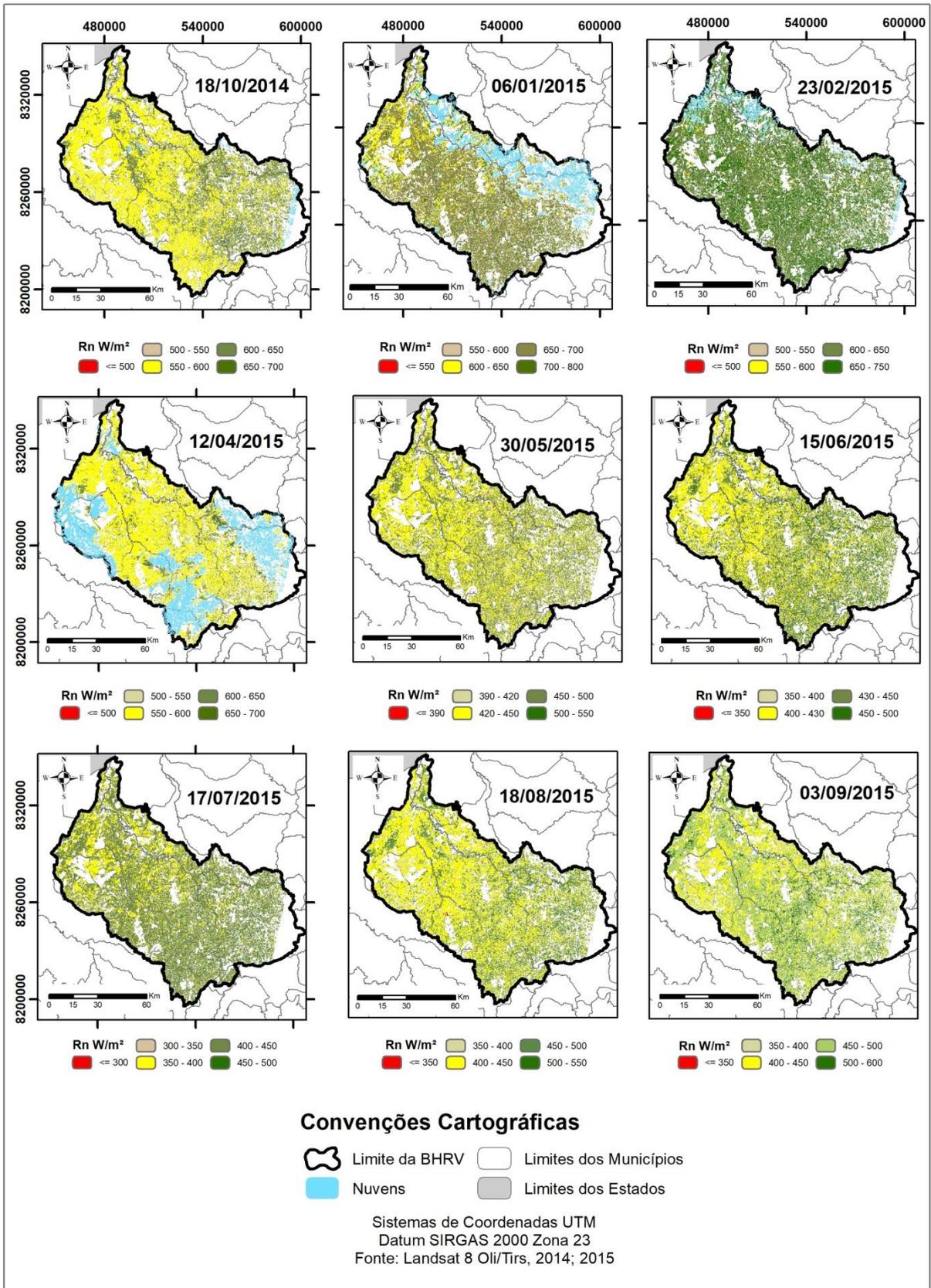
Em relação à época do ano, verificou-se que o saldo de radiação apresentou variações segundo a quantidade de energia incidente na superfície; no entanto, essa variação foi marcada em função do nível de degradação da pastagem, onde as áreas com maiores valores de albedo (alta reflectância), como aquelas com maior exposição de solo (pastagem degradada), tiveram a tendência para menores valores de saldo de radiação.

Analisando-se a Figura 20, observa-se claramente uma mudança nos valores do saldo de radiação entre as datas estudadas, sendo constatada uma diminuição desses valores no período de estiagem. Esse resultado pode ser explicado pela sazonalidade da radiação solar global, provocando mudanças significativas nas áreas de pastagens. Esta redução dos valores de R_n está relacionada com a estação climática, que para os meses do período de estiagem (abril, maio, junho, julho e agosto) há um aumento no ângulo de elevação solar (Z), onde quanto maior o Z , menor será a incidência da radiação global, devido ao maior caminho óptico que os raios solares tem que percorrer para chegar à superfície. Dessa forma, a diminuição da radiação solar incidente, juntamente com a diminuição da disponibilidade hídrica, provoca mudanças nas áreas de pastagens.

Nos mapas de R_n para os dias do período chuvoso (18 de outubro de 2014, 06 de janeiro, 23 de fevereiro e 12 de abril), observa-se um predomínio das classes que variam entre 550 e 750 W/m^{-2} ; esse padrão pode ser explicado pela influência que a estação chuvosa

provoca nas áreas de pastagens e a quantidade de radiação global incidente, pois a disponibilidade hídrica e altos valores de radiação incidente aumentam o potencial fotossintético dessas áreas, apresentando altos valores de Rn. Portanto, esse resultado está associado à dinâmica que o regime chuvoso e disponibilidade de radiação incidente provocam nas áreas de pastagem. A pastagem verde indica alta absorção da radiação eletromagnética na faixa do comprimento de onda do vermelho, por causa da clorofila nas folhas verdes, e alta da reflectância na faixa do infravermelho próximo, apresentando com isso altos valores de Rn (LILLESAND *et al.*, 2007). Quanto mais água disponível, maior a transpiração e aumento desta variável (Rn) (GOMES *et al.*, 2013), em função do uso de mais energia radiativa neste processo. Em relação aos valores abaixo de 300 W/m^{-2} no período analisado, estes evidenciam áreas de pastagem com algum nível de degradação, pois os baixos volumes de forragem interferem no balanço radioativo, sendo que essas áreas podem apresentar altos valores de albedo de superfície, devido à maior exposição do solo, afetando diretamente a valores mais baixos de Rn.

Figura 20 – Saldo de radiação nas áreas de pastagens da BHRV.



Fonte: autor (2018).

Os mapas de Rn para o período de estiagem, sobretudo nos dias 30 de maio, 15 de julho, e 17 de julho apresentam a menor variação para o período analisado, podendo ser explicado pela redução da radiação solar incidente, sendo esta uma característica da estação do ano. Nos mapas dos dias 18 de agosto e 03 de setembro, os valores de saldo de radiação tiveram relativo aumento, assim como o valor de radiação solar incidente, ficando claro que a quantidade de radiação que atinge a superfície é um fator de suma importância no balanço radioativo. De modo geral, nas análises dos mapas, nota-se que a variação do Rn no período estudado está diretamente correlacionada à quantidade de radiação global incidente.

No entanto, a variação do Rn é influenciada também pelos níveis de degradação das áreas de pastagens, onde constatou-se os menores valores de saldo de radiação. Resultados semelhantes foram encontrados por Bezerra (2004), em áreas de vegetação degradada nas adjacências no município de Petrolina-PE, assim como por Bezerra (2006), em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense, com menores valores de Rn em áreas com solo exposto e/ou com vegetação muito rala. Estudos realizados por Veloso (2014) em áreas de pastagens circunvizinhas ao projeto de irrigação Jaíba- MG, observou-se valores de Rn entre 354 W/m² a 685 W/m² na estação seca e chuvosa respectivamente. Esses resultados corroboram com os obtidos nessa pesquisa.

4.3 – Componentes do Balanço de Radiação, Energia e Evapotranspiração Real em Áreas de Pastagem na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho

A aplicação das técnicas de sensoriamento remoto na estimativa de dados biofísicos como a evapotranspiração real (ETR) é de grande relevância, dada a grande variabilidade deste fenômeno no espaço, principalmente em grandes áreas, condicionado a uma série de fatores e restrições ambientais (variabilidade temporal), tais como fatores climáticos, radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e vento, bem como fatores relacionados à planta, como estágio de desenvolvimento foliar, altura e profundidade do sistema radicular, de manejo e do solo, além da declividade do terreno. Dessa forma, devido às diferenças dos elementos que compõem a paisagem, a determinação da evapotranspiração, levando-se em consideração sua variabilidade espacial e temporal, é de significativa importância (VELOSO, G.A, *et al.*, 2017; FERNANDES, F.H.S, 2017).

A análise da evapotranspiração, com o objetivo de entender a assimilação do carbono pela planta (fotossíntese), é importante, pois a transpiração também ocorre, em partes, via

fotossíntese, sendo esse processo bioquímico essencial para o desenvolvimento e sobrevivência da planta (BADGLEY *et al.*, 2017).

Portanto, os dados de ETR (em valores diários em mm.dia⁻¹) foram obtidos inicialmente de forma instantânea no momento da passagem do satélite e (por volta das 10:00 da manhã), posteriormente calculados para o período de 24 horas, para todas as cenas de satélite empregadas nesse estudo. Os dados complementares às imagens do Landsat 8 - OLI/TIRS, utilizados no balanço de radiação, balanço de energia e estimativa da ETR com o SEBAL, estão descritos na Tabela 06, obtidos na estação meteorológica A014, localizada no município de Goiás Velho, sob a responsabilidade do INMET.

Tabela 06 – Dados da estação meteorológica, incluindo Temperatura do ar (T) máxima e mínima diárias (°C), Umidade relativa (UR) máxima e mínima (%), velocidade média do vento (vv m s⁻¹) a 2 metros, pressão atmosférica média diária (p_o, kPa), radiação solar global diária (R_{s24}, MJ m⁻²).

Dias	Tmax	Tmin	URmax	URmin	VV	p_o	R_{s24}
18/10/2014	38,50	24,20	48	14	2,60	95,41	22,33
06/01/2015	34,20	21,30	90	48	2,20	95,78	23,70
23/02/2015	31,70	20,30	94	52	1,50	95,79	24,45
12/04/2015	30,40	21,70	95	55	0,90	95,70	13,37
30/05/2015	32,30	20,40	85	37	0,90	95,72	19,13
15/06/2015	31,90	18,00	87	33	0,80	95,87	18,83
17/07/2015	30,70	18,00	66	28	5,00	96,19	19,47
18/08/2015	34,40	20,20	60	19	5,40	95,97	22,94
03/09/2015	38,30	18,90	52	12	2,30	95,64	24,62

Fonte: INMET (2014, 2015).

Observa-se que nos dias analisados, a temperatura do ar variou entre 18,00 °C e 39,90 °C, enquanto a umidade relativa do ar variou entre 12% e 95%. A velocidade média do vento apresentou variação entre 0,80 e 5,40 m s⁻¹; enquanto a pressão atmosférica apresentou estabilidade, com variação entre 95,41 e 96,19 kPa. A radiação solar global diária manteve-se entre 13,37 e 24,62 MJ m⁻². Na Figura 21 são apresentados os mapas da ETR para as áreas de pastagem na BHRV, nos dias analisados, apresentando classes com magnitude ≤1,00 a 6,5 mm.dia⁻¹. Salienta-se que resultados semelhantes foram observados no estudo de VELOSO *et al.* (2017), no qual encontraram valores de ETR variando entre 1,02 mm dia⁻¹ e 6,68 mm dia⁻¹ durante todo um ciclo hidrológico, em áreas de pastagens na região norte do Estado de Minas Gerais.

A ETR referente aos dias 06 de janeiro e 02 de fevereiro de 2015 apresentaram os maiores valores no período analisado, variando de 1,0 a 6,5 mm.dia⁻¹, no qual aproximadamente 85% das áreas de pastagem apresentaram valores predominantes entre 3 e 5

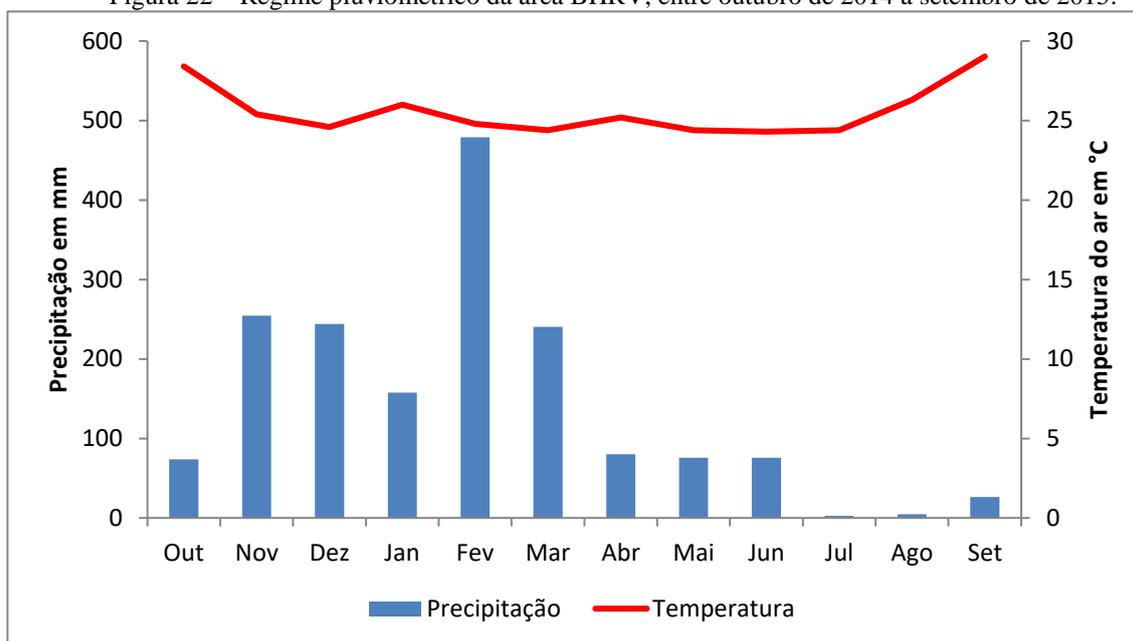
mm.dia⁻¹. Esse padrão de valores mais elevados está associado à estação chuvosa, na qual as áreas de pastagem estão em pleno desenvolvimento, apresentando valores de NDVI, em sua maioria, na ordem de 0,58 a 0,70 (ou seja, com elevada atividade fotossintética). Esse resultado está associado à dinâmica que o regime chuvoso provoca nessas áreas, pois a pastagem com boa disponibilidade hídrica, radiação solar e temperaturas ideais apresentam alta absorção da radiação na faixa de onda do espectro vermelho, por causa da clorofila nas folhas verdes, e alta refletância na faixa do infravermelho próximo, apresentando com isso altos valores de NDVI (LILLESAND *et al.*, 2007; VELOSO *et al.*, 2017). Nesse mesmo período, há uma maior incidência de radiação solar devido à menor inclinação do ângulo solar, apresentando um valor de radiação solar incidente de 24,45 MJ m⁻², impactando no valor de saldo de radiação na ordem de 600 W/m⁻².

Observa-se que os valores elevados de ETR em áreas de pastagens estão diretamente relacionados à estação do ano, bem como à quantidade de energia disponível para este processo. Esse fato torna-se mais evidente quando são analisados os mapas (Figura 21) nos dias seguintes (dias 12 de abril, 30 de maio, 15 de junho, 17 de Julho e 18 de agosto), com uma diminuição nos valores de ETR, voltando a apresentar aumento no dia 03 de setembro. Essa diminuição do valor da evapotranspiração está associada à sazonalidade do clima local, marcada pela mudança no regime hídrico entre a estação chuvosa e de estiagem (Figura 21), bem como pela diminuição da radiação solar incidente.

Para esses dias os valores de ETR ficaram abaixo de 3 mm dia⁻¹ em 80% das áreas de pastagem. Este resultado está associado à dinâmica que a estiagem imprime nessas áreas, pois encontra-se em estado de estresse hídrico e tende a absorver menos radiação solar, aumentando sua refletância na faixa do visível, e absorvendo mais na faixa do infravermelho. Dessa forma, a diferença da refletância tende a decrescer quando a pastagem está mais seca.

Percebe-se que os maiores valores de evapotranspiração real acompanham as variações das condições pluviométricas, como demonstrado no gráfico da Figura 22.

Figura 22 – Regime pluviométrico da área BHRV, entre outubro de 2014 a setembro de 2015.



Fonte: INMET (2015).

Observa-se que os picos pluviométricos estão localizados entre os meses de novembro e março, com declínio acentuado a partir de abril, atingindo um aumento no mês de setembro. A quantidade de água precipitada em todo o período de estudo foi de aproximadamente 1715 mm, no qual 85% deste montante encontram-se concentrados nos meses entre outubro e março, sendo que a partir de abril a precipitação torna-se cada vez mais escassa, atingindo os pontos mais baixos nos meses de julho e agosto. Esse fato foi constatado pelos dados apresentados na Figura 21 (dias 12 de abril, 30 de maio, 15 de junho, 17 de Julho e 18 de agosto), isto é, os menores valores médios de ETR no período analisado estão diretamente relacionados com a disponibilidade de chuva, sendo que no período de estiagem as áreas de pastagens apresentam significativas mudanças devido ao estresse hídrico.

Ainda com base nos mapas da Figura 21, no dia 03 de setembro há um aumento nos valores da ETR em relação aos dias anteriores, fato este associado a uma maior incidência de

radiação solar global, e aumento na precipitação. Os valores médios de temperatura do ar para cada mês se mantiveram com boa estabilidade, apresentando variação entre 24 °C e 29 °C, sendo esse parâmetro de significativa importância para o desenvolvimento da planta. De acordo com Rosa e Sano (2013), a temperatura ideal para a produtividade em pastagem como a *Brachiaria Brizanta* encontra-se no intervalo de 15 °C a 25°C. Portanto, a variável temperatura não se mostrou um fator limitante para o desenvolvimento da planta no período analisado.

Para uma melhor análise do comportamento da evapotranspiração no período estudado, realizou-se uma análise estatística nas áreas de pastagem em cada dia do período, com o objetivo de melhor compreender a variação da evapotranspiração tanto no espaço quanto no tempo. A Tabela 07 apresenta os parâmetros estatísticos mínimo, máximo, médio e desvio padrão da ETR obtidos em áreas de pastagem na BHRV.

Tabela 07–Parâmetro estatístico dos valores de Evapotranspiração real (mm.dia⁻¹) em áreas de pastagem na BHRV.

Datas	PARÂMETROS DA ETR NA PASTAGEM			
	Mínimo	Máximo	Médio	Desvio Padrão
18/10/2014	0,41	4,55	2,10	0,53
06/01/2015	0,63	6,53	4,15	0,73
23/02/2015	0,55	6,54	4,55	0,56
12/04/2015	0,23	3,45	2,20	0,27
30/05/2015	0,32	4,47	2,70	0,34
15/06/2015	0,21	4,22	2,72	0,32
17/07/2015	0,25	4,34	1,89	0,52
18/08/2015	0,34	5,53	1,69	0,66
03/09/2015	0,21	5,24	2,85	0,62

Fonte: autor (2018).

Dessa forma, os valores observados de evapotranspiração em áreas de pastagens para os dias analisados variaram entre 0,21 mm.dia⁻¹ e 6,54 mm.dia⁻¹, o que permite inferir que existe um padrão nos maiores e menores valores de ETR para o período analisado, explicados pela correlação direta com a sazonalidade climática e a quantidade de radiação solar global. A ETR seguiu as variações da precipitação e radiação solar incidente, com os maiores valores estimados no período chuvoso, obtendo valores de até 6,5 mm.dia⁻¹. De acordo com Baruch & Fernandez (1993), a taxa de evapotranspiração para a atmosfera em áreas de pastagem na estação chuvosa está relacionada à eficiência da produtividade da gramínea neste período.

Porém, na estação seca, com a escassez das precipitações ocorre uma diminuição significativa da ETR, apresentando valores próximos de 0,5 mm dia⁻¹, provocando a

diminuição da área verde, devido à alta sensibilidade dos estômatos ao gradiente de pressão de vapor. Estudos realizado por Silva *et al.* (2005), em áreas de capim Tanzânia no município de Piracicaba - SP, observaram valores médios de evapotranspiração de 4,13 mm dia⁻¹. Já Meirelles *et al.* (2003) encontraram valores de evapotranspiração média de 5,9 mm dia⁻¹ e com variação de 1,9 mm dia⁻¹ para mais ou para menos em áreas de pastagem de *Brachiaria brizantha* na região central do cerrado. Essas diferenças de valores de ETR encontradas nesta pesquisa e nas dos demais autores podem estar relacionadas a diferentes condições climáticas das localidades estudadas.

A Figura 23 ilustra o processo de repartição do Rn pelos componentes do balanço de energia (Fluxo de calor Latente - LE, Fluxo de calor sensível - H e Fluxo de calor no solo - G) obtidos em uma amostra de pastagem para os dias estudados, para 10 pixels ao longo do período analisado.

Observa-se, que o saldo de radiação (Rn) apresentou variação entre 650 a 430 Wm⁻², onde há uma predominância do consumo dessa energia pelo fluxo de calor latente – LE, principalmente no período chuvoso. Salienta-se que o fluxo de calor latente (LE) corresponde à quantidade de energia, utilizada nos processos de evapotranspiração e na transpiração dos vegetais.

No período chuvoso, que corresponde aos dias 18 de outubro, 06 de janeiro, 23 de fevereiro e 12 de abril, há predominância do consumo do Rn pelo LE, em aproximadamente 74%. Esse resultado é explicado pela influência do regime hídrico sobre as áreas de pastagem. No entanto, no decorrer do período analisado, percebe-se uma diminuição da energia utilizada para o processo de evaporação e transpiração das plantas (LE), e aumento do fluxo de calor sensível (H). O fluxo de calor sensível (H) corresponde à troca de calor entre a superfície e as camadas da atmosfera nas suas proximidades. Essas trocas de calor ocorrem, sobretudo, por convecção, devido às diferenças de temperatura entre a superfície e as camadas da atmosfera.

Os dias 06 de janeiro e 23 de fevereiro apresentam uma maior utilização do Rn para evaporação e transpiração das áreas de pastagem (LE), representando uma média de mais de 60% de toda energia envolvida no processo (variação de 300 a 480 Wm⁻²). Esse uso do Rn pelo LE pode ser explicado pelas condições físico-bióticas da pastagem, que começam a apresentar os primeiros sinais de estresse hídrico, por meio do declínio das precipitações e, conseqüentemente, na diminuição da retenção de umidade no solo (retração hídrica dos macroporos), tendo uma maior demanda por energia para realizar os processos fotossintéticos. Nesse contexto, o fluxo de calor sensível (H) se comportou de forma ascendente nos pixels

analisados, enquanto o fluxo de calor no solo (G) apresentou estabilidade, consumindo em média 13% do Rn.

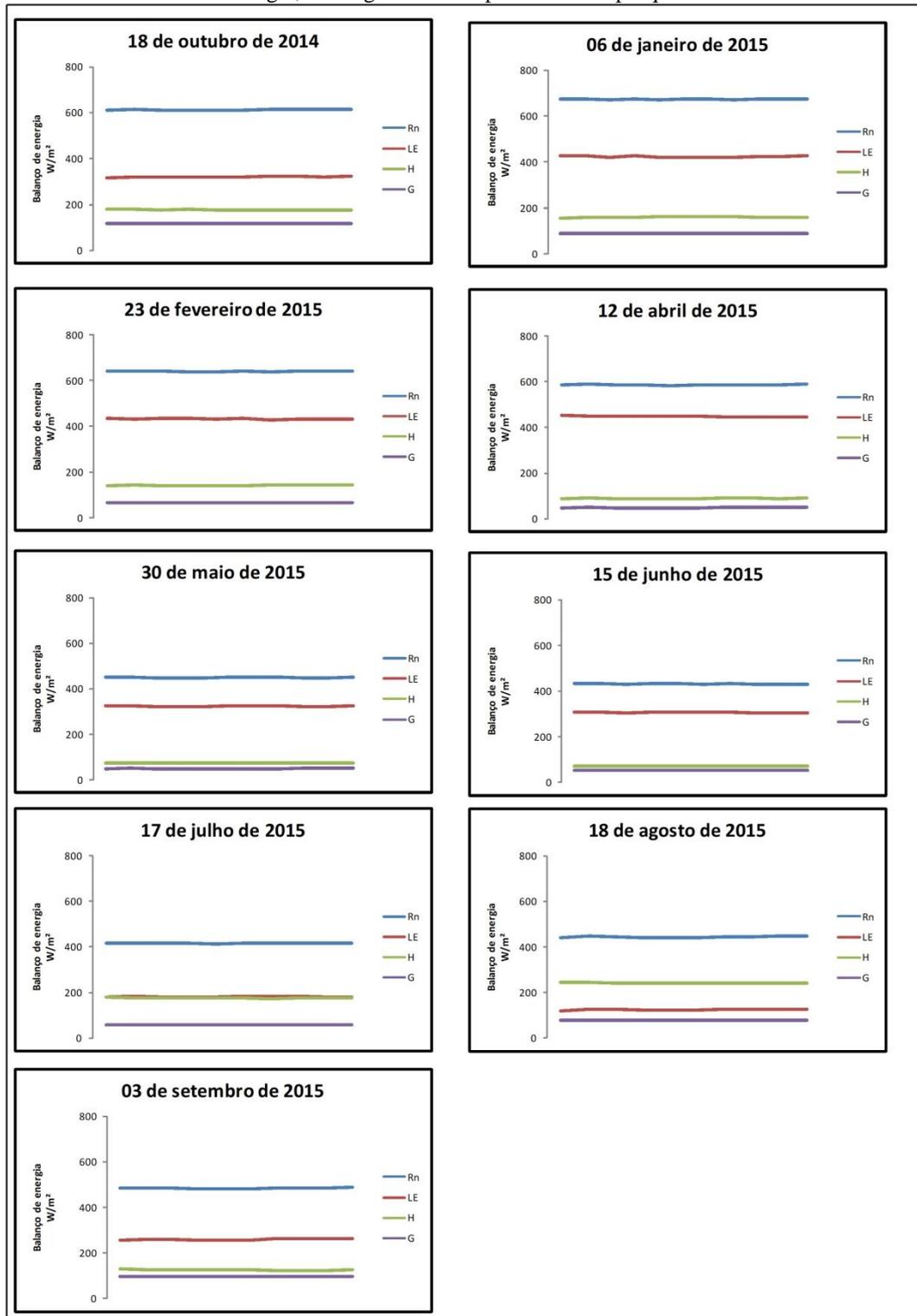
Todavia, nos dias 17 de julho e 18 de agosto, há um maior consumo do Rn (variação de 174 – 246 Wm⁻²) pelo fluxo de calor sensível (H), correspondendo em média a 50% da energia disponível empregada para aquecimento do ar próximo à superfície. Este fato está relacionado com o prolongamento dos dias com estiagem, deixando as áreas de pastagens em estresse hídrico.

No dia 03 de setembro, os valores de saldo de radiação apresentaram aumento em relação aos dias anteriores. O Rn máximo atingiu 432 Wm⁻² e o mínimo de 395 Wm⁻², sendo que o consumo do Rn voltou ser utilizado em aproximadamente 65% pelo LE, sendo este resultado influenciado pela precipitação registrada em dias anteriores, influenciando na evapotranspiração e produção de biomassa.

O fluxo de calor no solo (G) apresentou-se estável no período analisado, consumindo em média 15% do Rn, representando o transporte vertical de calor através dos processos de condução, onde o calor é transmitido das camadas mais superficiais para as camadas mais profundas no período diurno, e no sentido inverso no período noturno.

De maneira geral, os valores de evapotranspiração condicionados às áreas de pastagem nos dias estudados, bem como à sazonalidade climática da região, são influenciados por dois fatores primordiais: mudanças no valor de entrada de energia no sistema (alteração estacional) e a distribuição temporal das precipitações.

Figura 23 – Distribuição do Rn em área de pastagem na BHRV, em função dos componentes do balanço de energia, ao longo de todo o período desta pesquisa.



Fonte: autor (2018).

4.4 – Carbono Fixado pela Pastagem na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho

A Produtividade Primária Bruta (*Gross Primary Productivity – GPP*) é considerada uma variável fundamental dos ecossistemas, por sequestrar o carbono atmosférico e

disponibilizá-lo aos processos metabólicos ecofisiológicos. A mesma pode ser considerada como a soma da fotossíntese realizada por todas as folhas em escala ecossistêmica. Ademais, resulta da integração em escala temporal de dias ao ano, medida em unidades de massa por área por tempo (ex. g C m⁻² dia⁻¹) (CHAPIN *et al.*, 2011).

Para a estimativa da produtividade primária bruta em áreas de pastagem na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho- BHRV foi utilizado a metodologia do modelo SEBAL/CASA, bem como a aplicação de parte da metodologia do MOD17A2 nas imagens Landsat8, com a diferença que nestas usou-se a eficiência de uso da luz (LUE) máxima específica para a *Brachiaria brizanta*, bem como dados climáticos locais, com uma simplificação da estimativa da FPAR com base nas imagens de NDVI, como explicado anteriormente nos materiais e métodos.

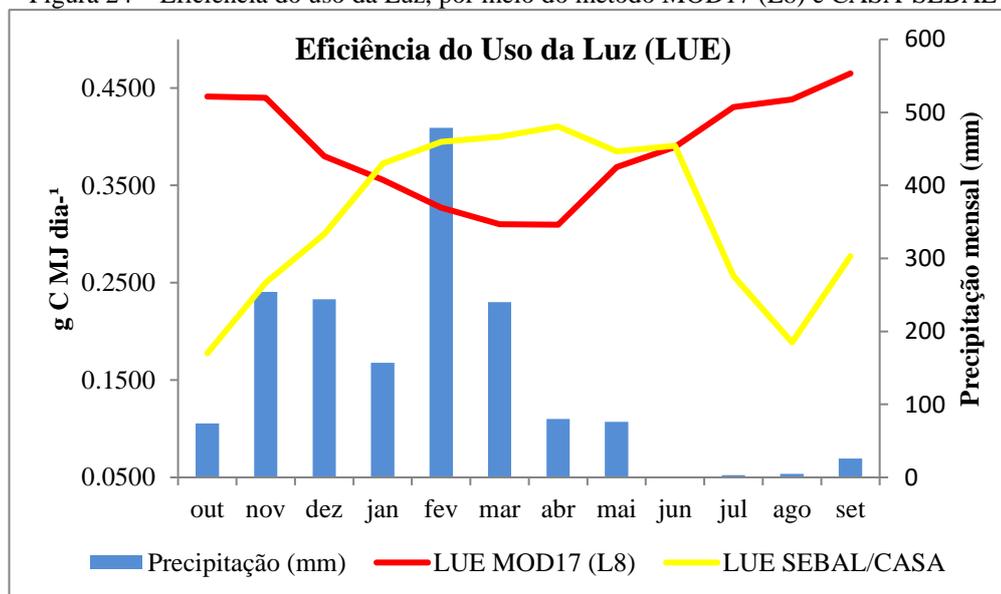
Os dados complementares às imagens do Landsat8OLI/TIRS para a estimativa da GPP estão representados na Tabela 08. Observa-se que a radiação fotossinteticamente ativa – PAR manteve-se entre 7,75 e 14,28 MJ m⁻² dia⁻¹, apresentando significativa variação nos dias analisados. Os parâmetros T₁ e T₂ refletem a contribuição da temperatura na LUE pelas plantas, situando-se entre 0,988 e 0,739 sendo o primeiro relacionado à imagem do mês de fevereiro, (com os maiores valores de NDVI), parâmetros estes utilizados no cálculo da LUE no método SEBAL/CASA. Os parâmetros T_{min} Escalar e VPD Escalar são fatores de atenuação da LUE da pastagem, sendo o primeiro relacionado à temperatura e o segundo ao déficit de pressão de vapor, sendo estes parâmetros utilizados para o cálculo da LUE no método MOD17 Landsat 8 (ou MOD (L8)). A Figura 24 mostra a variação da LUE calculada por estes métodos, apresentando variações entre 0,3096 g C MJ dia⁻¹ (12 de abril) e 0,4650 g C MJ dia⁻¹ (03 de setembro) no método MOD17 (L8), e 0,1888 g C MJ dia⁻¹ (18 de agosto) e 0,4105 g C MJ dia⁻¹ (12 de abril) no método SEBAL/CASA.

Tabela 08 – Datas das imagens Landsat8 OLI/TIRS, T₁ e T₂, referentes aos dias selecionados para a pesquisa, TMIN_Scalar, VDP_Scalar, Radiação fotossinteticamente ativa diária – PAR (MJ m⁻² dia⁻¹).

Data da Coleta de campo	Data da Passagem do satélite	T ₁	T ₂	TMIN Escalar	VDP Escalar	PAR 24h
02/10/14	18/10/14	0,988	0,739	1	0,882	12,95
06/01/15	06/01/15	0,988	0,939	1	0,712	13,75
23/02/15	23/02/15	0,988	0,951	1	0,654	14,75
12/04/15	12/04/15	0,988	0,957	1	0,619	7,75
24/05/15	30/05/15	0,988	0,951	1	0,738	11,09
21/06/15	15/06/15	0,988	0,959	1	0,779	10,92
27/07/15	17/07/15	0,988	0,953	1	0,861	11,29
14/08/15	18/08/15	0,988	0,943	1	0,877	11,80
06/09/15	03/09/15	0,988	0,888	1	0,930	14,28

Fonte: autor (2018).

Figura 24 – Eficiência do uso da Luz, por meio do método MOD17 (L8) e CASA-SEBAL



Fonte: autor (2018).

Observa-se no gráfico da Figura 24 que a variação da LUE pelo método SEBAL/CASA acompanhou bem a variação da precipitação; já o método MOD17 (L8) apresenta valores mais elevados no período de estiagem (principalmente nos meses de julho e agosto) do que o primeiro método, superestimando a GPP para este período.

Liu *et al.*, (2011) discutem que a metodologia empregada pelo modelo MOD17A2H pode apresentar superestimativa da GPP em áreas de restrição hídrica devido à falta explícita de representatividade de água no solo no sistema. Portanto, o método SEBAL/CASA apresentou maior eficiência na demonstração do estresse hídrico sofrido pelas áreas de pastagens no período de estiagem, no qual a estimativa da GPP por este modelo contabiliza o fator água no processo de fixação do carbono pela pastagem, empregando em seu método a

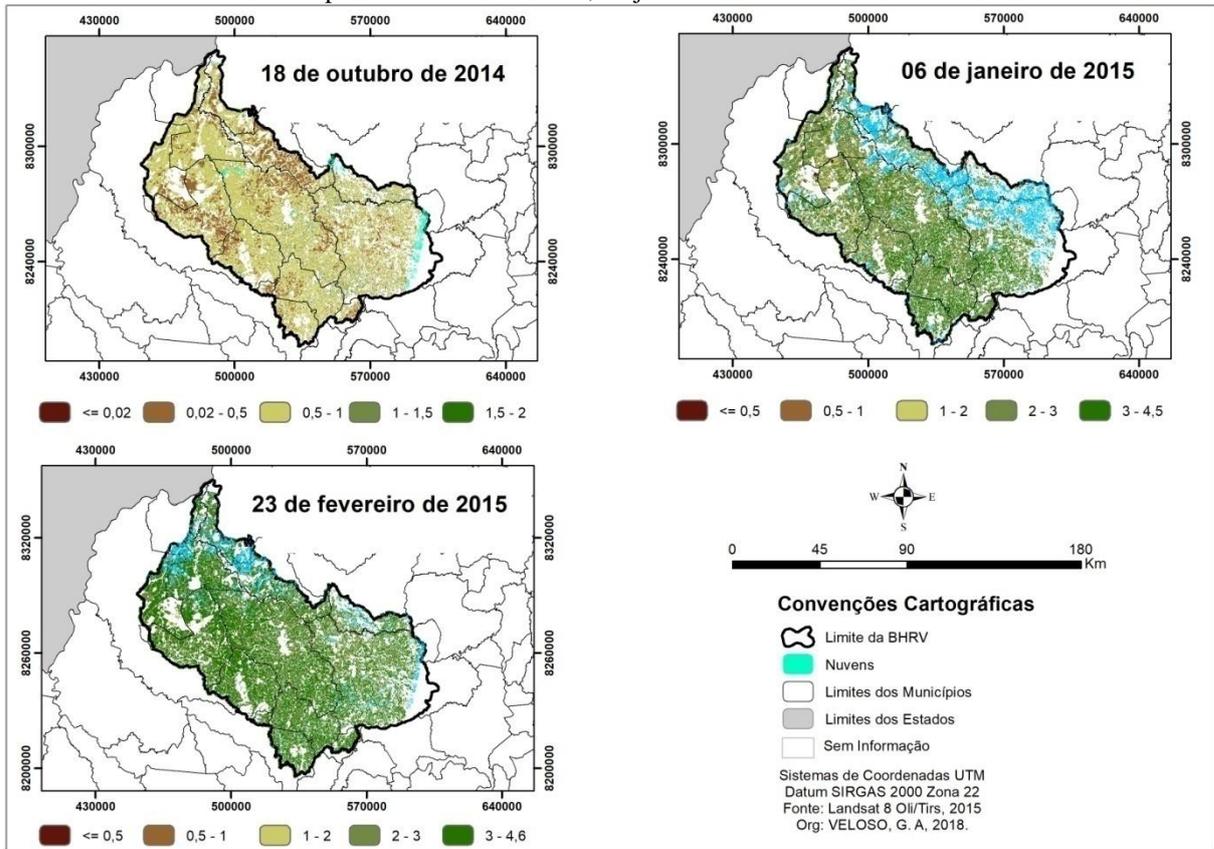
estimativa da fração evaporativa (metodologia SEBAL), apresentando variação espacial (adimensional) de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta.

Nas Figuras 25, 26 e 27 estão apresentados os mapas temáticos da GPP estimados pela metodologia SEBAL/CASA para os dias analisados, com variação entre $\leq 0,10$ e $4,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Nas Figuras 28, 29 e 30 estão apresentados os mapas temáticos da GPP estimados pela metodologia MOD17 com imagens Landsat 8OLI/TIRS (ou método MOD17 (L8)), com variação entre $\leq 0,50$ e $4,0 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Com a análise dos dados de variação da GPP entre as duas metodologias, percebe-se que no período de estiagem, os valores de GPP estimados pela metodologia SEBAL/CASA tendem a ser menores que a metodologia MOD17 (L8), enquanto no período chuvoso os valores da primeira tendem a serem relativamente maiores. Este resultado está relacionado com as variações da LUE estimada por cada método. Na metodologia SEBAL/CASA a estimativa da LUE acompanhou bem as restrições hídricas no solo nos meses de maior prolongamento da estiagem (julho e agosto), apresentando valores de LUE com variações médias no período estudado de $0,18$ a $0,39 \text{ g C MJ dia}^{-1}$, sendo os maiores valores no período chuvoso (outubro a março) e os menores no período de estiagem (abril a setembro).

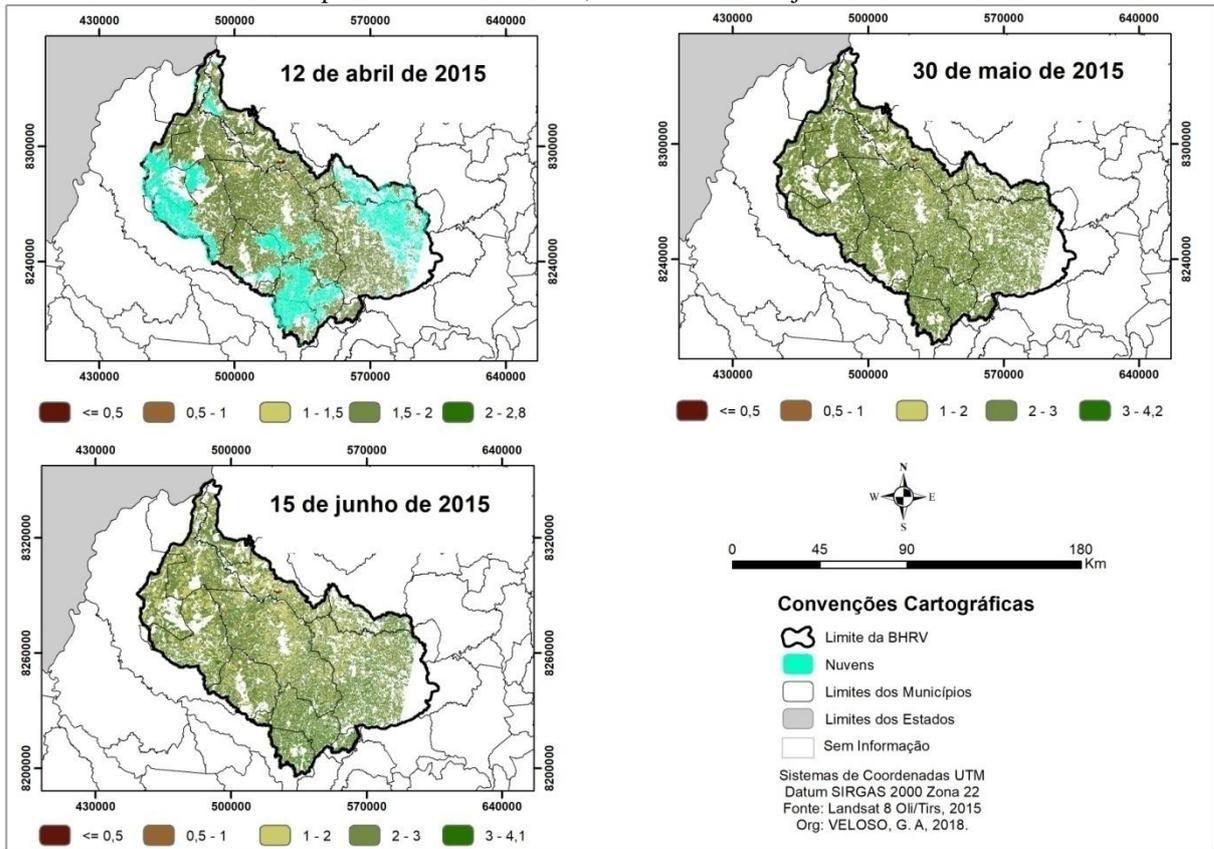
Este resultado indica que o fator água afeta significativamente a assimilação do carbono pela planta. Os valores de LUE estimada pelo método MOD17 (L8) demonstrou menor variabilidade no período analisado, com variação entre $0,3096 \text{ g C MJ dia}^{-1}$ (12 de abril) e $0,4650 \text{ g C MJ dia}^{-1}$ (03 de setembro), como demonstrado no gráfico da Figura 24.

Figura 25 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em $g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$, por meio do modelo SEBAL/CASA para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.



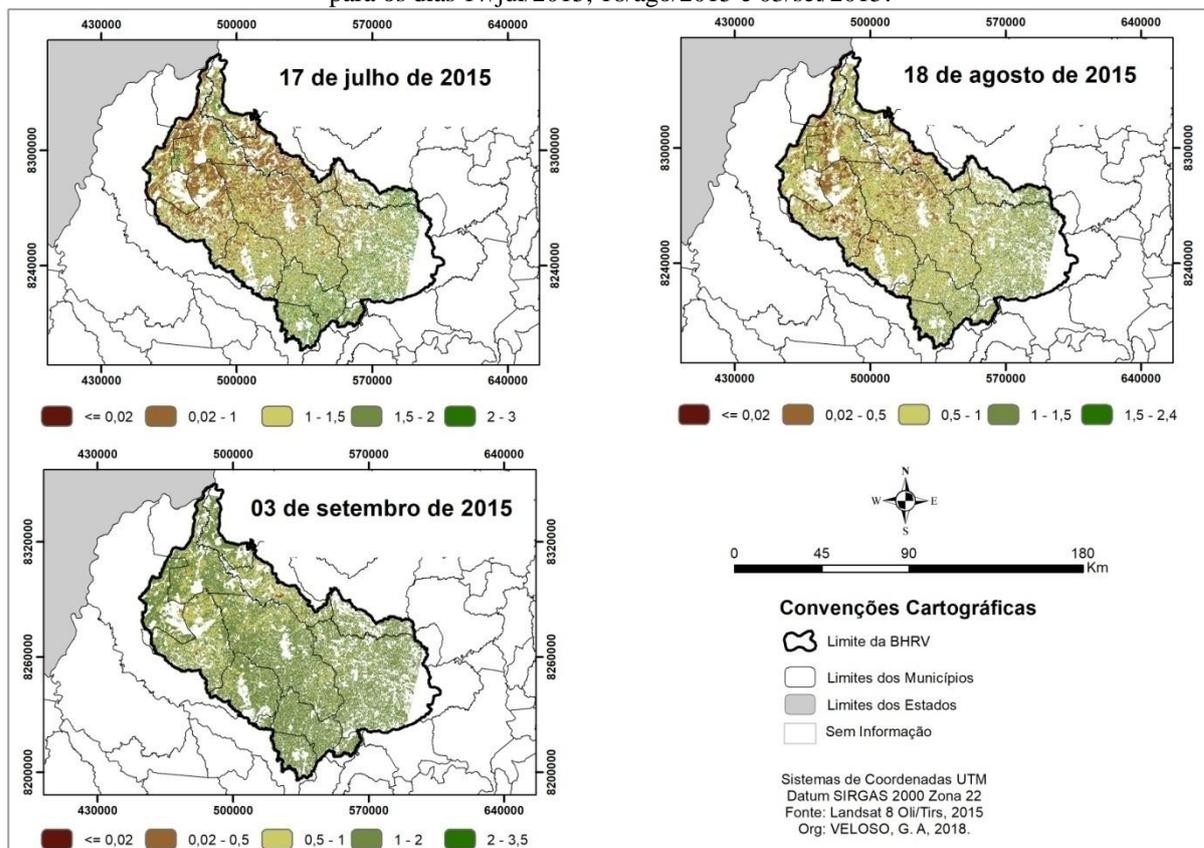
Fonte: autor (2018).

Figura 26 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em $g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$, por meio do modelo SEBAL/CASA para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jun/2015.



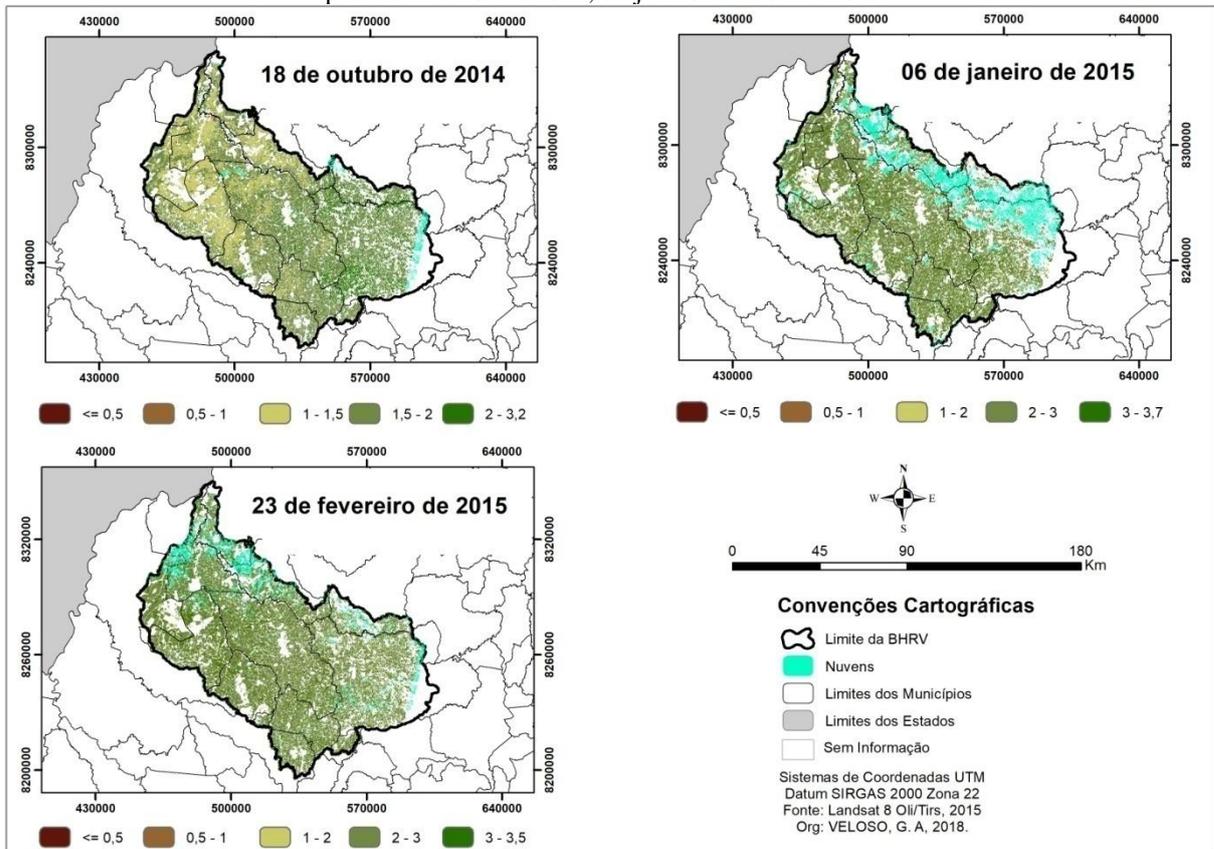
Fonte: autor (2018).

Figura 27 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em $g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$, por meio do modelo SEBAL/CASA para os dias 17/jul/2015, 18/ago/2015 e 03/set/2015.



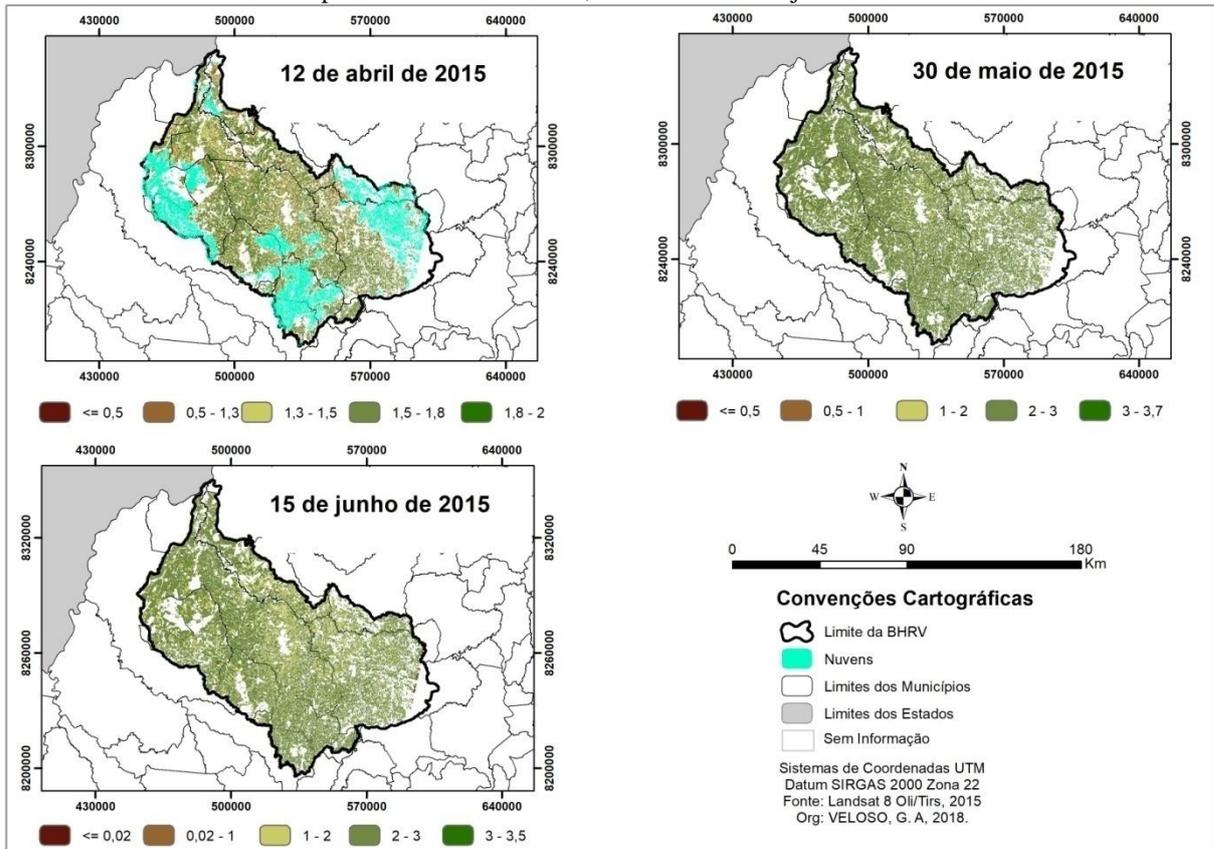
Fonte: autor (2018).

Figura 28 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em $g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$, por meio do modelo MOD17 (L8) para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.



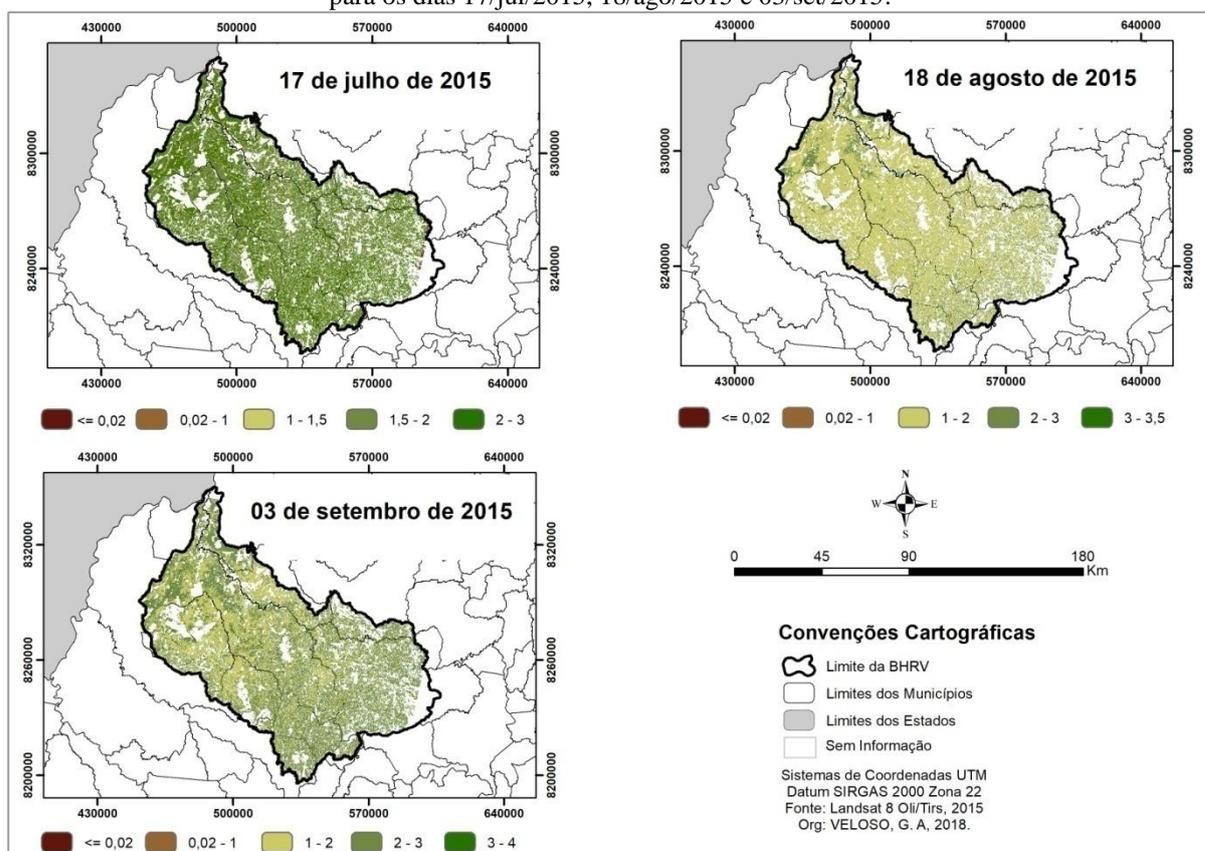
Fonte: autor (2018).

Figura 29 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em $g\ C\ m^{-2}\ dia^{-1}$, por meio do modelo MOD17 (L8) para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jun/2015.



Fonte: autor (2018).

Figura 30 – Produtividade Primária Bruta para a BHRV em $\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, por meio do modelo MOD17 (L8) para os dias 17/jul/2015, 18/ago/2015 e 03/set/2015.



Fonte: autor (2018).

Os maiores valores de GPP foram obtidos no dia 23 de fevereiro na metodologia SEBAL/CASA, com predominância da classe de 3 a $4,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, correspondendo a aproximadamente 70% das áreas de pastagem, sendo este resultado associado aos altos valores de NDVI, radiação solar incidente e da fração evaporativa, bem como altos valores de LUE, sendo observados valores médios de $0,4 \text{ g C MJ dia}^{-1}$ para este dia. Além disso, este dia corresponde ao período da estação chuvosa, caracterizada por boa disponibilidade hídrica e maior valor de radiação fotossinteticamente ativa ($14,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) no período analisado.

Sabe-se que a vegetação verde tem alta absorção da radiação na faixa do comprimento de onda do vermelho, por causa da clorofila nas folhas verdes, e alta refletância na faixa do infravermelho próximo. Para esse mesmo dia a metodologia do MOD17 (L8) apresentou predominância na classe de 2 a $3 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, correspondendo a aproximadamente 70% das áreas de pastagens. Esse padrão de produtividade das áreas de pastagem para este período está diretamente relacionado com fatores ambientais, como precipitação, umidade e altas temperaturas, sendo essas variáveis apontadas como as que mais influenciam a produção de forrageiras no Cerrado (TUCKER *et al.*, 1991; NEMANI *et al.*, 2003; MA *et al.*, 2013;

BORGES e SANO, 2014; GAO *et al.*, 2016). Churkina e Running (1998) discutem que em plantas tipo C4 como a *Brachiria Brizanta*, a disponibilidade de água controla em grande parte a produtividade em todas as regiões do planeta.

Estudos realizados em áreas de pastagens nas savanas africanas (EKLUNDH e OLSSON, 2003; HERRMANN *et al.*, 2005) observaram um aumento nos valores de NDVI com o aumento das disponibilidade hídrica em áreas de pastagem, corroborando com esta hipótese da relação entre disponibilidade hídrica e o aumento da produção das forrageiras.

Outro fator importante para a produtividade das áreas de pastagens é a temperatura, que para este período, apresentando valores médios de aproximadamente 27 °C (INMET, 2015), estando esta dentro da faixa de temperatura ideal para o desenvolvimento da planta (MCWILLIAM, 1978). Estudos desenvolvidos por Costa *et al.*, (2005) constataram um aumento na produção de matéria seca da *Brachiaria brizanthano* bioma Cerrado, com o aumento da temperatura.

Na data do dia 14 de abril foram registrados os menores valores de GPP, com predominância nas classes de 1,5 a 2,0 g C m⁻²dia⁻¹ na metodologia SEBAL/CASA e de 1,3 a 1,8 g C m⁻²dia⁻¹ na metodologia MOD17 (L8). Este resultado esta associado ao baixo valor de PAR registrado neste dia (7,75 MJ dia⁻¹), apresentando uma redução de aproximadamente 48% em relação ao dia 23 de fevereiro. Nota-se que para esta data as imagens apresentam alta nebulosidade, podendo este evento ter influenciado nos valores de PAR, impactando em baixos valores de GPP, pois a assimilação do carbono pela pastagem depende diretamente da intensidade de PAR.

Para o período de estiagem, a metodologia SEBAL/CASA demonstrou redução nos valores de GPP, apresentando valores médios de 2,57; 2,31; 1,27 e 0,80 g C m⁻²dia⁻¹ para os dias 30 de maio, 15 de junho, 17 de julho e 18 de agosto, respectivamente. Estes padrões de diminuição dos valores de GPP estão relacionados com a disponibilidade de água no solo, sendo que, no início do período de estiagem o solo ainda apresenta disponibilidade hídrica mas, com o prolongamento da estiagem e a redução de água nos solos, os valores tendem a diminuir, chegando ao valor médio mais baixo em 18 de agosto (0,80 g C m⁻²dia⁻¹), sendo que para estes últimos meses (junho, julho e agosto) foram registrados somente 8 mm de chuva (INMET, 2015). Outro fator relevante é a diminuição da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (PAR), sendo constatada uma redução de aproximadamente 20% em relação ao período chuvoso.

Dessa forma, a dinâmica que a estação de estiagem imprime nas áreas de pastagem é um fator importante, pois, com estresse hídrico, este ambiente tende a absorver menos

radiação solar, aumentando sua refletância na faixa do visível, enquanto absorve mais radiação na faixa do infravermelho, com menor acúmulo de biomassa. Este padrão de redução nos valores de GPP coincide com os estudos desenvolvidos por Qin *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014) e Eckert *et al.* (2015), que demonstram a redução nos padrões de precipitação nos períodos de estiagem, reduzindo a produtividade da planta. MEIRELLES *et al.* (2011) discutem que plantas como as pastagens são sensíveis ao estresse hídrico, pois os sistemas radiculares são rasos, apresentando maior vulnerabilidade às variações de umidade no solo. Portanto, a planta em estresse hídrico diminui o processo fotossintético, onde o hidrogênio presente na composição química da água é utilizado para a conversão do dióxido de carbono em carboidratos (PONZONI *et al.*, 2012).

Resultados semelhantes foram encontrados por MA *et al.* (2016) que observaram uma redução nos índices de produtividade quando verificaram uma baixa nos índices pluviométricos no período de 2000 a 2012, em áreas com diferentes fitofisionomias na Austrália. Rosa e Sano (2013), em um estudo realizado em áreas de pastagens na bacia do Rio Paranaíba, verificaram os menores valores de produtividade primária (NPP) no período de estiagem, sendo este resultado relacionado com baixos índices de chuva e elevadas temperaturas. Estes autores argumentam que a combinação de elevadas temperaturas com baixos níveis de umidade no solo, induzem as plantas a fechar os estômatos, reduzindo a saída de água para a atmosfera (evapotranspiração) e a assimilação do CO₂, provocando o declínio da taxa fotossintética.

Ainda com base na Figura 27, para o dia 03 de setembro é observado um aumento nos valores de GPP, resultado este com o aumento das precipitações no período, que entre o dia 18 de agosto e 03 de setembro foi registrado na estação meteorológica volumes de precipitação na ordem de 24 mm. Isso demonstra a sensibilidade do método SEBAL/CASA à detectar as variações climáticas da região e seus impactos nas áreas de pastagens.

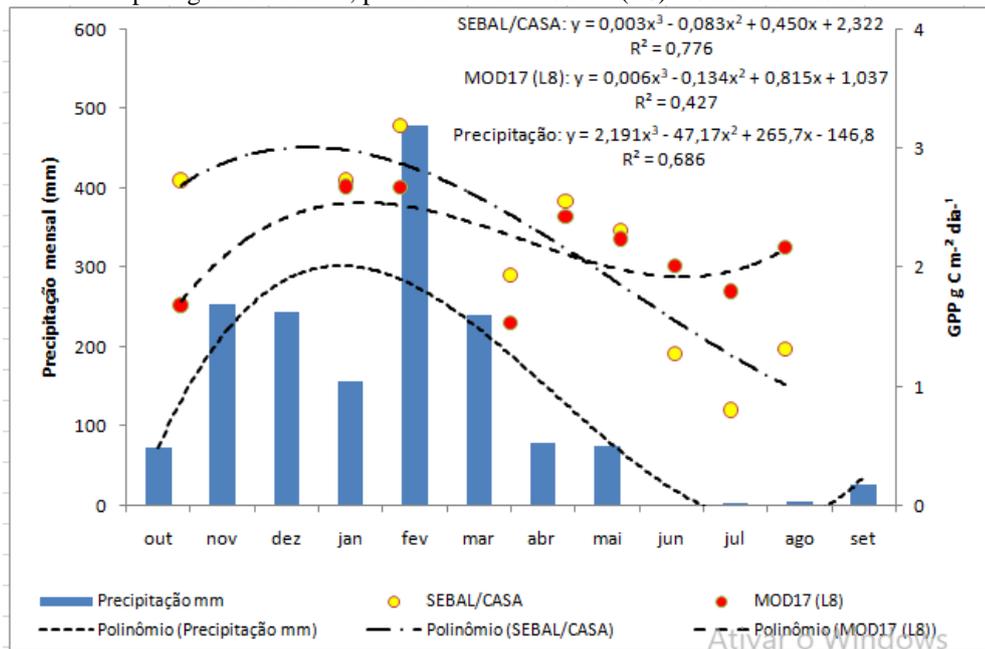
Já na metodologia MOD17 (L8), Figuras 29 e 30, estas apresentaram menor variação espaço-temporal do GPP no período estudado, obtendo-se valores médios de 2,43; 2,24; 2,02; 1,81 g c m⁻²dia⁻¹ para os dias 30 de maio, 15 de junho, 17 de julho e 18 de agosto, respectivamente. Os resultados deste método também seguem uma tendência de redução nos valores de GPP com o prolongamento da estiagem, no entanto com maiores diferenças nos valores observados entre a metodologia SEBAL/CASA para os meses onde a pastagem apresenta maior estresse hídrico (julho e agosto). Ainda assim, o método SEBAL/CASA demonstrou maior sensibilidade à sazonalidade climática da região em relação ao método

MOD17 (L8), devido a este levar em consideração o fator água expresso na fração evaporativa (obtida com o SEBAL).

Para melhor explicar a sazonalidade da GPP em áreas de pastagem, foi gerado um modelo de regressão polinomial para simular a variação desta em todos os dias do ano, correlacionando este resultado com os dados de precipitação registrada em cada mês. Na Figura 31 estão apresentados os resultados da simulação da GPP em áreas de pastagens com o método SEBAL/CASA e MOD17 (L8). Nota-se que na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho, conforme os dados de precipitação pluviométrica têm-se duas estações bem definidas, uma seca, de abril a setembro, e outra chuvosa, de outubro a maio. Contudo, quando se analisa a GPP, observa-se que com o fim da estação chuvosa, inicia-se o processo de deficiência hídrica no solo, prejudicando a pastagem em desenvolver todo seu potencial de crescimento.

No entanto, a diminuição da produtividade da pastagem no período de estiagem é mais evidente nos meses de julho e agosto, devido ao prolongamento da seca, sendo que nos primeiros meses deste período, a pastagem ainda mantém bons níveis médios de produção devido à disponibilidade de umidade no solo. A metodologia SEBAL/CASA foi mais sensível em detectar essa variação sazonal da GPP em áreas de pastagens da BHRV; além disso, a redução nos valores de GPP acompanhou a redução das precipitações, demonstrando a sensibilidade do método às variações climáticas da região, sendo possível afirmar que as variações do clima local afetam diretamente os valores de GPP.

Figura 31 – Modelos de Regressão para Simulação da Variabilidade da GPP ao longo do ano em áreas de pastagens na BHRV, pelos métodos MOD17 (L8) e SEBAL/CASA.



Fonte: autor, 2018

Como demonstrado pela curva de simulação, o método MOD17 (L8) teve pouca redução nos valores de GPP na transição entre o período chuvoso para o de estiagem, mantendo uma certa estabilidade no ano, sendo menos sensível no acompanhamento da sazonalidade climática.

Para uma análise do desempenho dos métodos, foi realizada uma comparação dos valores de GPP estimados pelas imagens de satélite e daqueles observados pelo modelo de regressão. A metodologia adotada para a comparação dos resultados foi fundamentada na estimativa do índice de correlação de Pearson, do erro absoluto médio, da raiz do erro quadrático médio e do índice de concordância de Willmott. Na Tabela 09 observa-se um alto grau de correlação entre os dados estimados pelo método SEBAL/CASA e os observados pelo modelo de regressão, sendo que o índice de correlação de Pearson se aproxima da correlação perfeita positiva (1) para o período analisado. Já o erro absoluto médio (EMA) e a raiz do erro quadrático médio (RQEM) são medidas da precisão do modelo; como se trata de um erro quadrático, associa-se o maior peso aos maiores desvios, sendo o ideal para este índice é que ele seja o menor possível; no entanto, dada a magnitude das estimativas, os erros apresentados pelo modelo SEBAL/CASA podem ser considerados baixos.

A análise do índice de concordância ou ajuste de Willmott é uma das formas de medir a exatidão, relacionada à aproximação dos valores estimados em relação aos observados, seus valores variam de zero, onde não existe concordância, a 1, para a concordância perfeita. Nesse

sentido, o método SEBAL/CASA apresentou alta concordância com o modelo de regressão polinomial, acompanhando bem os efeitos da sazonalidade climática nas pastagens da BHRV.

Tabela 09– Índices de correlação de Pearson, erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e índice de concordância de Willmott (d), aplicados aos dados de produtividade primária bruta nos métodos SEBAL/CASA e MOD17 (L8).

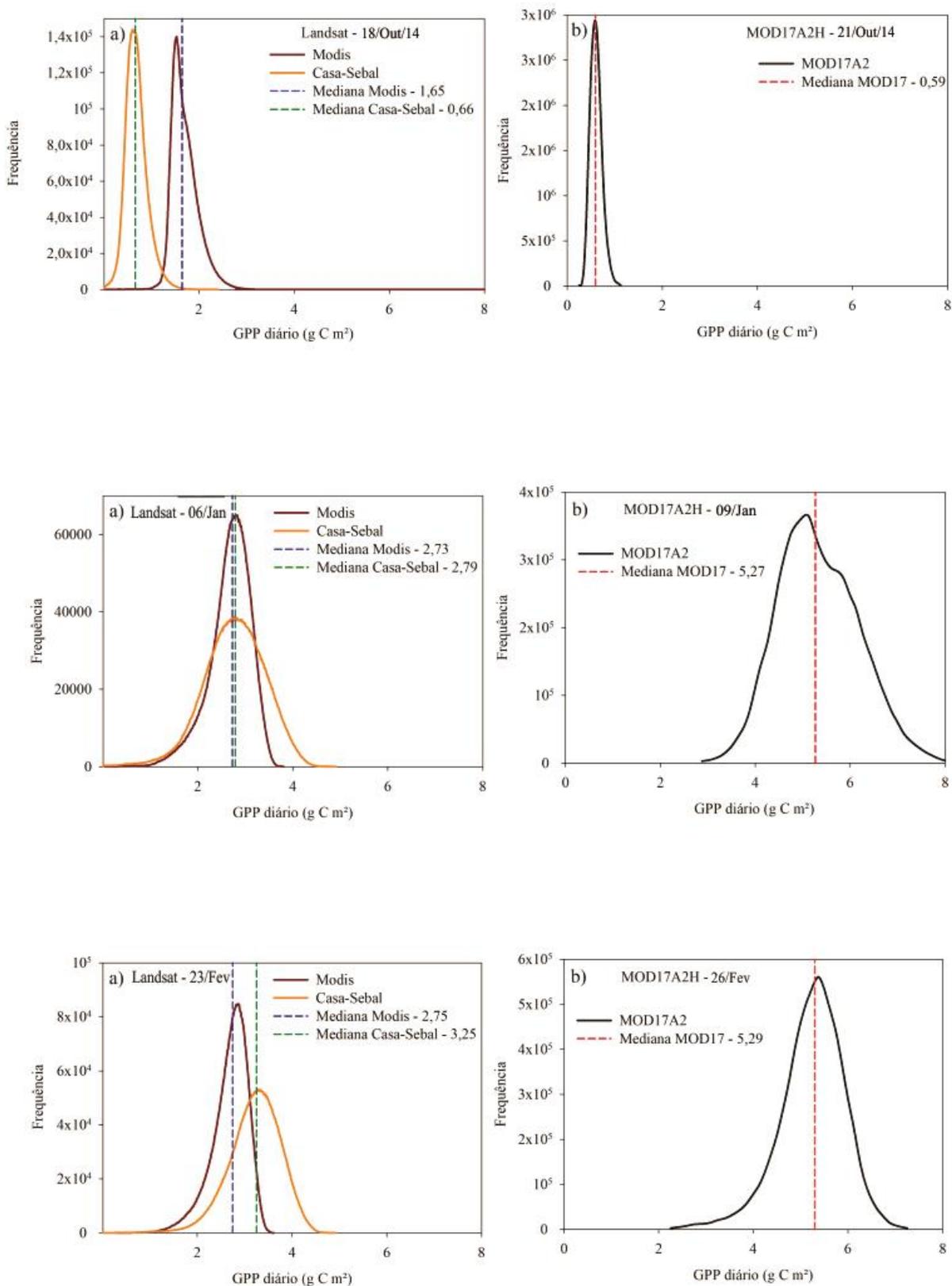
Método	Correlação de Pearson	EAM (g C m ⁻¹ dia ⁻¹)	REQM (g C m ⁻¹ dia ⁻¹)	d
CASA-SEBAL	0,898	0,3267	0,556	0,833
MOD17 (L8)	0,681	1,48	1,621	0,228

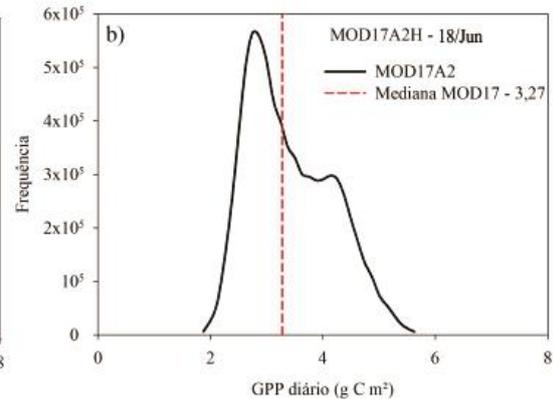
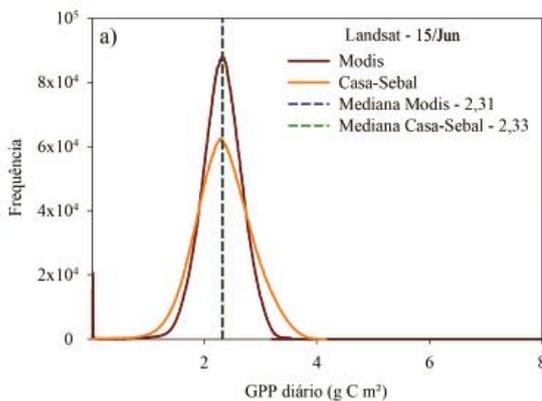
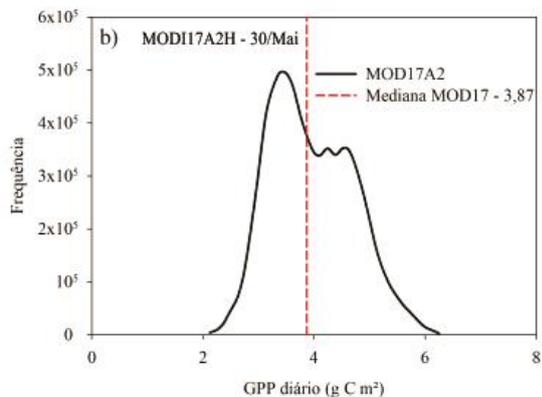
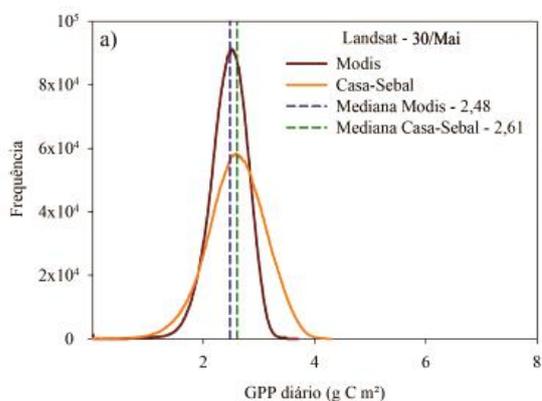
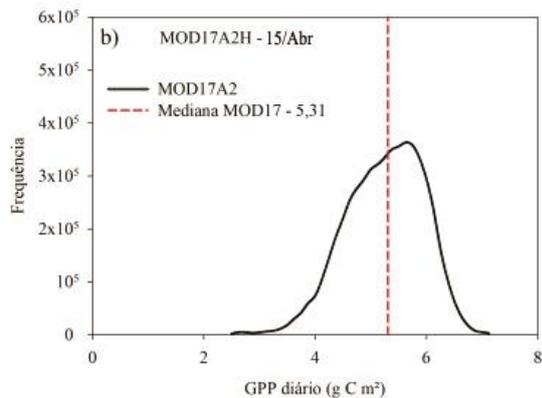
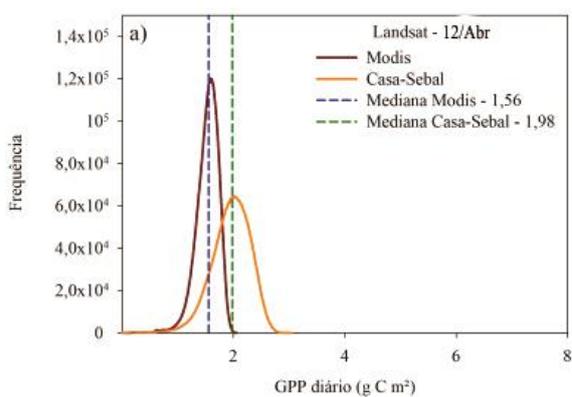
Fonte: autor (2018).

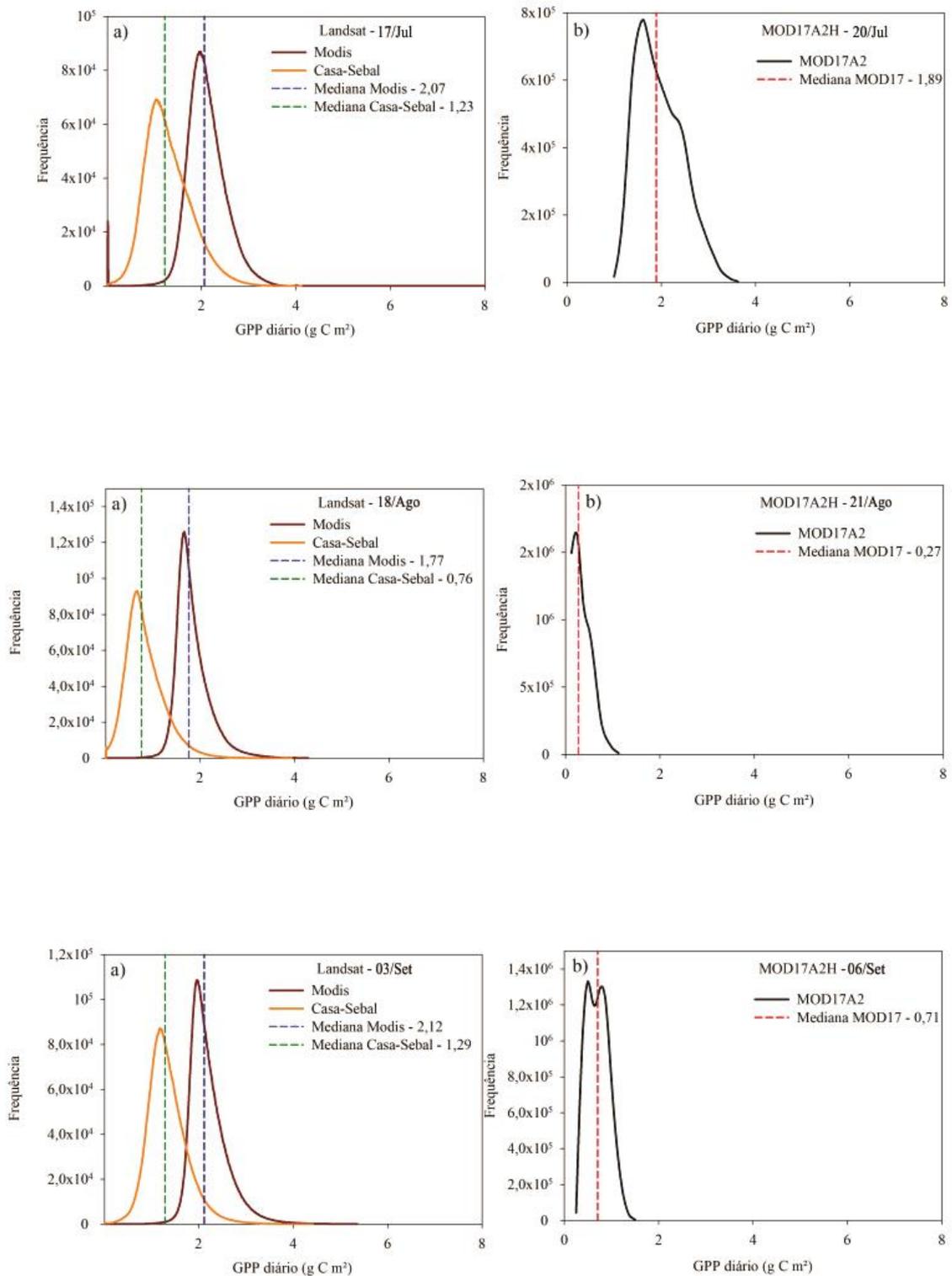
Com base na Tabela 09, nota-se que o método MOD17 (L8) apresentou desempenho inferior ao SEBAL/CASA, na comparação entre os dados estimados pelas imagens de satélite e o observado pelo modelo de regressão polinomial. Este resultado pode estar associado à pouca variação deste método no período de estresse hídrico do solo, sobretudo nos meses de julho e agosto, no qual os valores de LUE se mantiveram altos mesmo no período de prolongamento da estiagem (julho e agosto). No período de estiagem as áreas de pastagem sofrem significativas mudanças devido à baixa disponibilidade hídrica.

Na validação dos métodos aplicados nesta pesquisa com o produto do MOD17A2H (coleção 6), observa-se que os valores de GPP ficaram significativamente mais baixos que este na maioria das datas analisadas. Os gráficos da Figura 32 apresentam os valores de mediana nas áreas de pastagens na BHRV para os métodos SEBAL/CASA, MOD17 (L8) (Figura A) e o produto MOD17A2H (Figura B) para todos os dias analisados. O método MOD17 (L8) apresentou valores de mediana que variaram entre 1,56 g C m⁻¹ dia⁻¹ (12 de abril) a 2,75 g C m⁻¹ dia⁻¹ (23 de fevereiro), já o método SEBAL/CASA apresentou valores de mediana que variaram entre 0,66 g C m⁻¹ dia⁻¹ (18 de outubro de 2014) e 3,25 g C m⁻¹ dia⁻¹ (23 de fevereiro). O produto MOD17A2H apresentou valores superiores ao estimados nesta pesquisa, na maioria dos dias analisados, com variação entre 0,27 g C m⁻¹ dia⁻¹ (18 de agosto) a 5,39 g C m⁻¹ dia⁻¹ (15 de abril).

Figura 32 – Gráficos dos valores de mediana dos métodos SEBAL/CASA, MOD17 (L8) e Produto MOD17A2H.







Fonte: autor (2018).

Para as datas do período chuvoso, os valores da mediana do GPP ficaram por volta de $5 \text{ g C m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, apresentando uma diferença média de $2,5 \text{ g C m}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ entre os métodos aplicados nesta pesquisa. Para o período de estiagem, o produto MOD17A2H apresentou redução nos valores de GPP, chegando ao valor mais baixo na data do mês de agosto ($0,27 \text{ g}$

C m⁻¹ dia⁻¹), no entanto, para a data do mês de setembro, quando foi observado um aumento nos valores de NDVI devido à volta da precipitação registrada para este período, este produto apresentou pouca sensibilidade a retomada do processo fotossintético da pastagem. Atribui-se esse resultado à baixa resolução espacial deste produto (500 metros) em relação às imagens do Landsat 8OLI/TIRS (30 metros).

Essas diferenças de resultados provavelmente estão associadas a vários fatores relacionados à metodologia do MOD17A2H, que pode ter influenciado nos valores mais elevados de GPP nas áreas de pastagens. A Emax é um dos fatores que interfere nos valores de GPP, onde o valor atribuído às áreas de pastagens neste produto é de 0,86 g C MJ dia⁻¹, todavia, o valor atribuído nesta pesquisa foi de 0,50 g C MJ dia⁻¹, estimado para a pastagem da espécie *Brachiaria Brizanta* nas condições climáticas do Cerrado.

Na metodologia do MO17A2H é atribuído um valor de Emax para cada um dos biomas mapeados no globo (MCD12Q1), sendo este uma fonte de possíveis erros, pois existe uma grande variedade de sistemas nos ambientes terrestre, no qual um valor de Emax de um determinado bioma possa apresentar comportamento diferente em outras condições climáticas, mesmo este sendo para biomas semelhantes. Um exemplo é que um valor de Emax atribuído às áreas de pastagens no Brasil é o mesmo para as áreas de pastagens na Mongólia. Ou seja, mesmo sendo gramíneas, este valor de Emax pode se comportar de forma diferente devido a grande diversidade de fatores ambientais.

Outra fonte de possíveis erros são os dados meteorológicos envolvidos nessa metodologia, como o PAR, TMIN Escalar e VPD Escalar, sendo que esses últimos servem como fatores ambientais atenuantes do Emax, considerando a temperatura mínima do ar (TMIN Escalar) e o Déficit de pressão de vapor (VPD Escalar). Os possíveis erros relacionados a estes dados de entrada estão associados com a baixa resolução espacial dos produtos de entrada do GMAO (resolução espacial de 0,5° a 0,625°), sendo esta significativamente inferior à resolução do produto final MOD17A2H de 500 metros.

Apesar da metodologia MOD17A2H (coleção 6) ter apresentado melhoria em relação à escala dos dados meteorológicos de entrada, que na versão anterior (Coleção 5) eram de 1° x 1,25°, esta pode ser uma das principais fontes de erro. Mesmo esses dados meteorológicos passando por um rigoroso processo de interpolação, os erros causados pela baixa resolução original são difíceis de serem eliminados.

Além disso, o algoritmo do MOD17A2H utiliza dados de cobertura e uso da terra (produto MCD12Q1), onde a precisão da classificação deste produto determina diretamente o valor de Emax a ser atribuída a determinada superfície, ou seja, erros nessa classificação de

uso e cobertura do solo podem influenciar nas estimativas errôneas da GPP. Almeida *et al.*, (2017) avaliaram as incertezas inseridas pelo produto de cobertura e uso do solo do MCD12Q1H na estimativa da GPP em áreas da Amazônia e Cerrado, e concluíram que este produto apresenta erros significativos de classificação, sobretudo em áreas heterogêneas, tais como: áreas antropizadas e de savana. Levando-se em consideração que o bioma Cerrado apresenta um uso intenso e dinâmico da cobertura do solo, com significativa variação tanto no tempo como no espaço, as estimativas de GPP deste produto podem apresentar expressivos erros.

Outro produto que serve de entrada ao algoritmo do MOD17A2H para a estimativa da GPP é o produto MOD15A2H, referente à Fração da radiação fotossinteticamente absorvida – FPAR, que utiliza um complexo processamento de transferência radioativa para a estimativa desta. No entanto, os valores de referência que são utilizadas para cada bioma (MCD12Q1) na classificação de uso e cobertura do solo não podem ser negligenciados. Wang *et al.*, (2017) encontraram valor superestimados de FPAR em vários biomas do mundo, sendo estes resultados relacionados a erros nos dados meteorológicos e de classificação de uso e cobertura da terra.

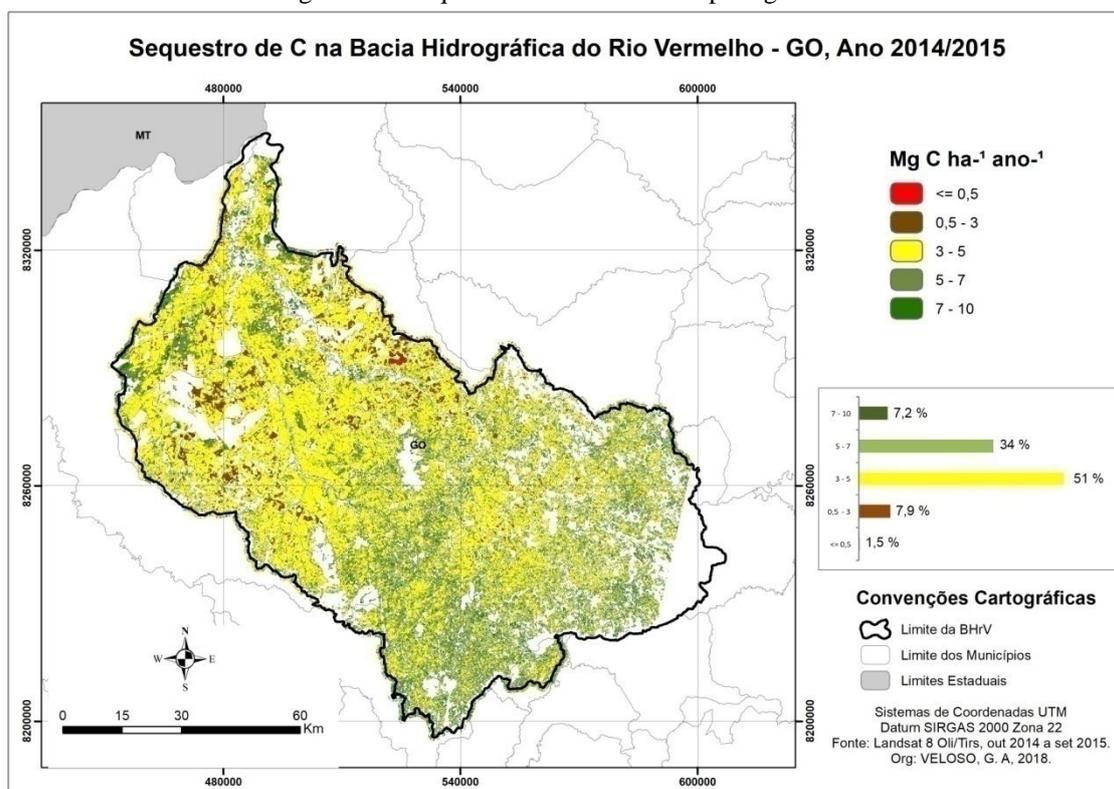
Portanto, a utilização de dados meteorológicos locais, bem como um bom produto de classificação de uso do solo, pode melhorar significativamente os dados estimados da GPP. Além disso, a utilização de imagens com resolução média como o Landsat 8OLI/TIRS (30 metros) pode proporcionar a análise dessas variáveis biofísicas em níveis de propriedade rural, auxiliando na identificação de possíveis áreas de degradação, tornando possível uma tomada de decisão mais eficiente.

Adicionalmente, a estimativa do carbono sequestrado pela pastagem pode apresentar melhores resultados com a aplicação de imagens com melhor resolução espacial. Nesse sentido, com os dados de GPP foi possível estimar o carbono sequestrado pela pastagem na BHRV. A Figura 33 apresenta os resultados estimados pelo método SEBAL/CASA, com variação de $\leq 0,5$ a $10 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. As áreas de pastagens da bacia apresentaram valores médios de $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, sendo a classe de maior frequência entre 3 e $5 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ (51%).

Os valores com maior potencial de sequestro de carbono na bacia estão mais concentrado no alto curso (classe entre 7 e $10 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, correspondendo a 7,2%), já as áreas com valores inferiores a $3 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ estão localizadas no médio e baixo curso da bacia, podendo indicar níveis de degradação dessas áreas, sendo que pastagens em estágio de degradação tendem a sequestrar menos carbono. Ronqui *et al.*, (2016) avaliaram a dinâmica

do carbono na fitomassa em áreas de pastagem no Estado de São Paulo, utilizando dados de sensoriamento remoto, encontrando valores de $11,7 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de carbono.

Figura 33 – Sequestro de C em áreas de pastagens na BHRV.



Fonte: autor (2018).

Comparativamente, Littig *et al.*, (2017) avaliaram o estoque de carbono aéreo em diferentes manejos de solos sob pastagem no município de Alegre - ES entre os anos de 2013 e 2014, em seis parcelas com diferentes sistemas de manejo de pastagens *Urochloa brizantha*, e observaram valores mais elevados de C no manejo de pastagem adubada ($10,61 \text{ Mg ha}^{-1}$), e valores mais baixos em áreas de pastagens queimadas ($2,76 \text{ Mg ha}^{-1}$). No sistema Integração Lavoura Pecuária Floresta (utilizando leguminosas como planta de cobertura) os valores também foram mais baixos ($2,72 \text{ Mg ha}^{-1}$). Estes resultados condizem com os encontrados nesta pesquisa, demonstrando a potencialidade dessa técnica na estimativa dessas variáveis, auxiliando em um melhor planejamento e tomada de decisão.

4.5 – Estimativa da Biomassa em Áreas de Pastagens na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho

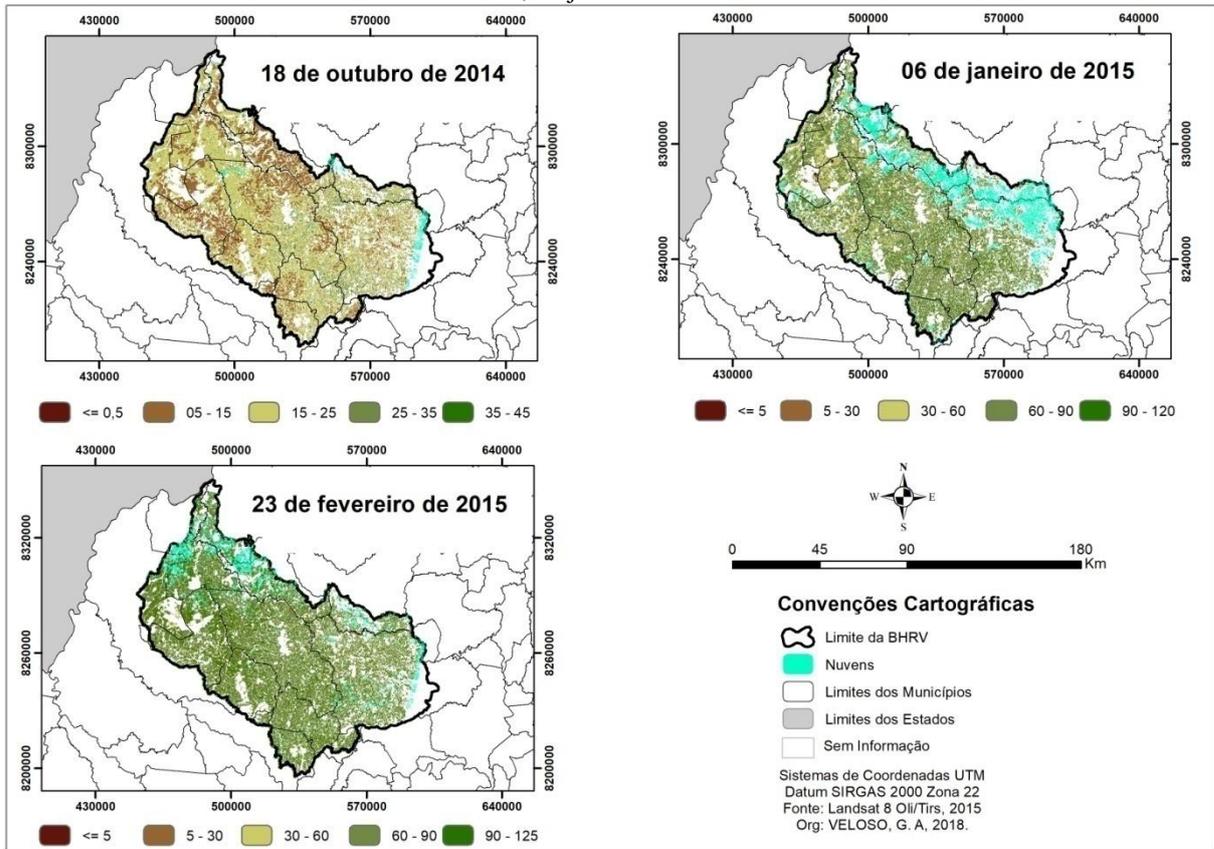
A partir das estimativas de GPP com as imagens do Landsat 8OLI/TIRS (métodos SEBAL/CASA e MOD17 (L8)), foi possível determinar a biomassa seca em áreas de

pastagens na BHRV. Nas Figuras 34, 35 e 36 estão representados os mapas temáticos de biomassa seca em kg MS ha⁻¹dia⁻¹ estimados pela metodologia SEBAL/CASA, com variação entre ≤10 e 125 kg MS ha⁻¹dia⁻¹. Nas Figuras 37, 38 e 39 estão apresentados os mapas temáticos de biomassa seca estimados pela metodologia MOD17 (L8), com variação entre ≤15 e 110 kg MS ha⁻¹dia⁻¹. O método SEBAL/CASA apresentou maior amplitude no período analisado, sendo mais sensível à sazonalidade climática. Em ambos os métodos, os maiores valores de biomassa seca foram registrados no período chuvoso, sobretudo nas datas de 06 de janeiro, 23 de fevereiro e 12 de abril de 2015. Para as datas do período chuvoso a metodologia SEBAL/CASA apresentou valores médios de 73, 86 e 52 kg MS ha⁻¹dia⁻¹ (06 de janeiro, 23 de fevereiro e 12 de abril). No entanto, na data de 18 de outubro de 2014 foram observados valores médios de 18 kg MS ha⁻¹dia⁻¹. Apesar do mês de outubro representar o início do período chuvoso, ainda há deficiência hídrica no solo, provocando baixos valores na produtividade de forragem.

Em contrapartida, no início do período de estiagem, (30 de maio), ainda que com uma redução nas precipitações, o solo ainda apresenta boa disponibilidade hídrica, e consequentemente as pastagens mantêm boa produtividade, sendo registrado neste dia médias de 69 kg MS ha⁻¹dia⁻¹. Na data seguinte (15 de junho), registra-se uma leve redução na produção de biomassa seca, com valores médios de 62 kg MS ha⁻¹dia⁻¹. A partir do mês de julho, a produtividade de biomassa reduz significativamente, apresentando valores médios de 30 kg MS ha⁻¹dia⁻¹ (17 de julho) e de 21 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ (18 de agosto), apresentando reduções em aproximadamente 50% em relação às datas anteriores. No entanto, na data de 03 de setembro, já é observado um aumento na produtividade de biomassa devido à retomada das precipitações registradas em dias anteriores.

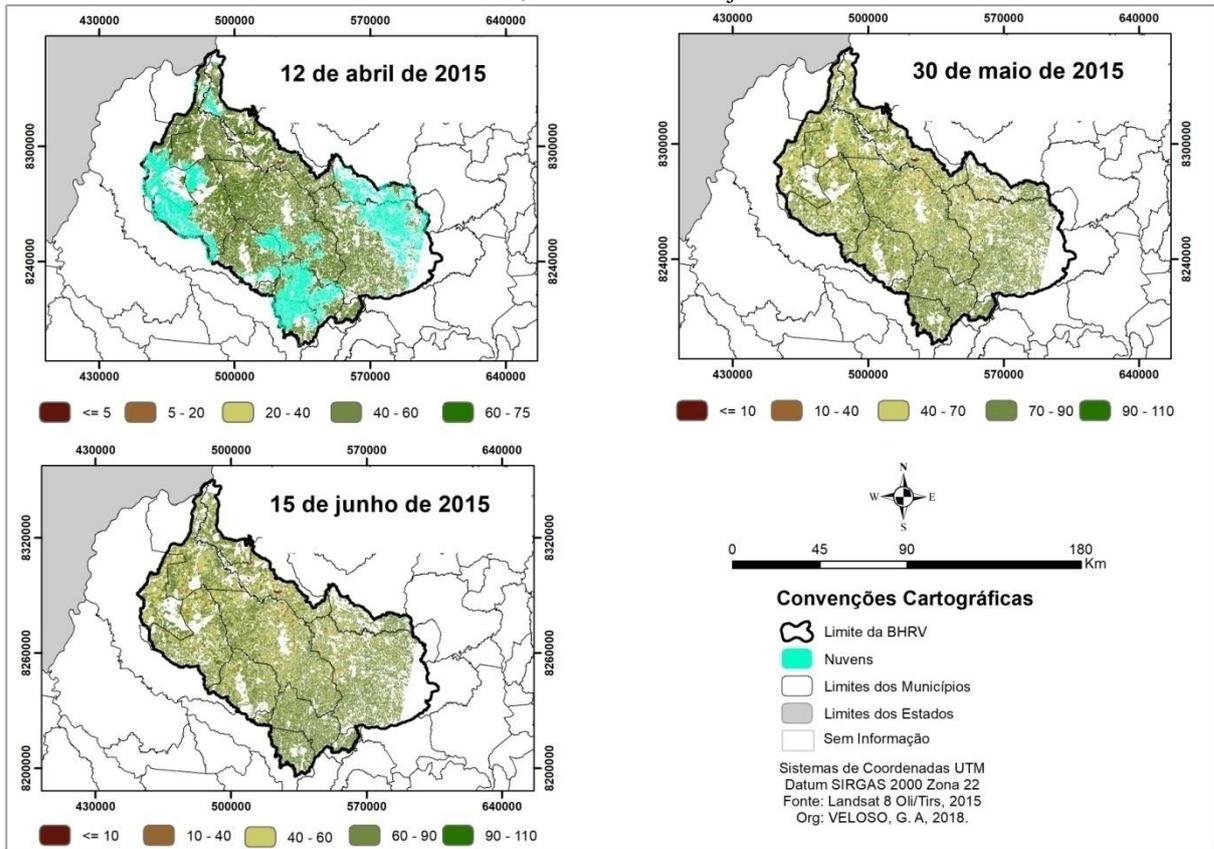
Observa-se, assim, que no período de estiagem (sobretudo de julho a setembro), a produção de biomassa é afetada significativamente, devido à baixa umidade solo. Os efeitos deste déficit hídrico mais imediato é o fechamento dos estômatos (provocando redução na condutância estomática), prejudicando a assimilação do carbono pela planta, por causa da limitação das trocas gasosas, reduzindo a produtividade (LEMAIRE, 2001).

Figura 34 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia⁻¹ método SEBAL/CASA para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.



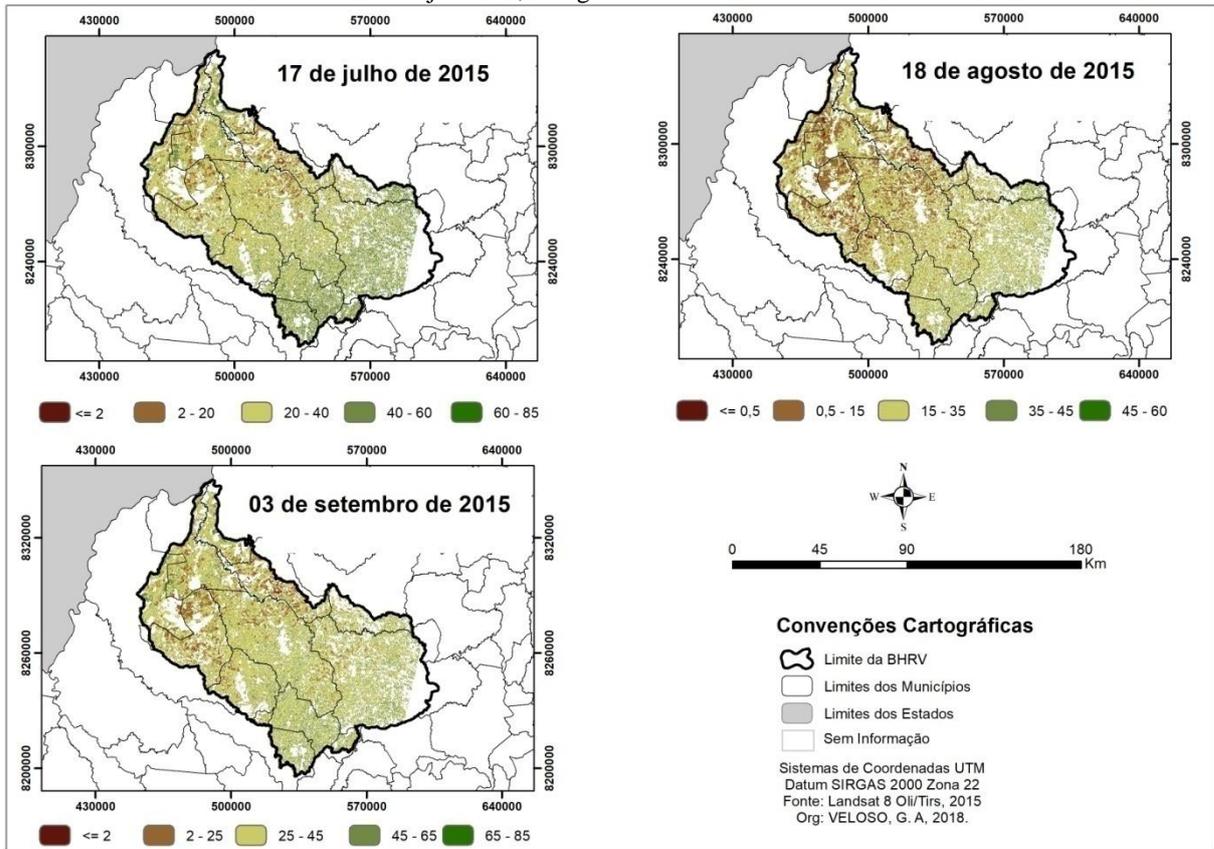
Fonte: autor (2018).

Figura 35 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia⁻¹ método SEBAL/CASA para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jul/2015.



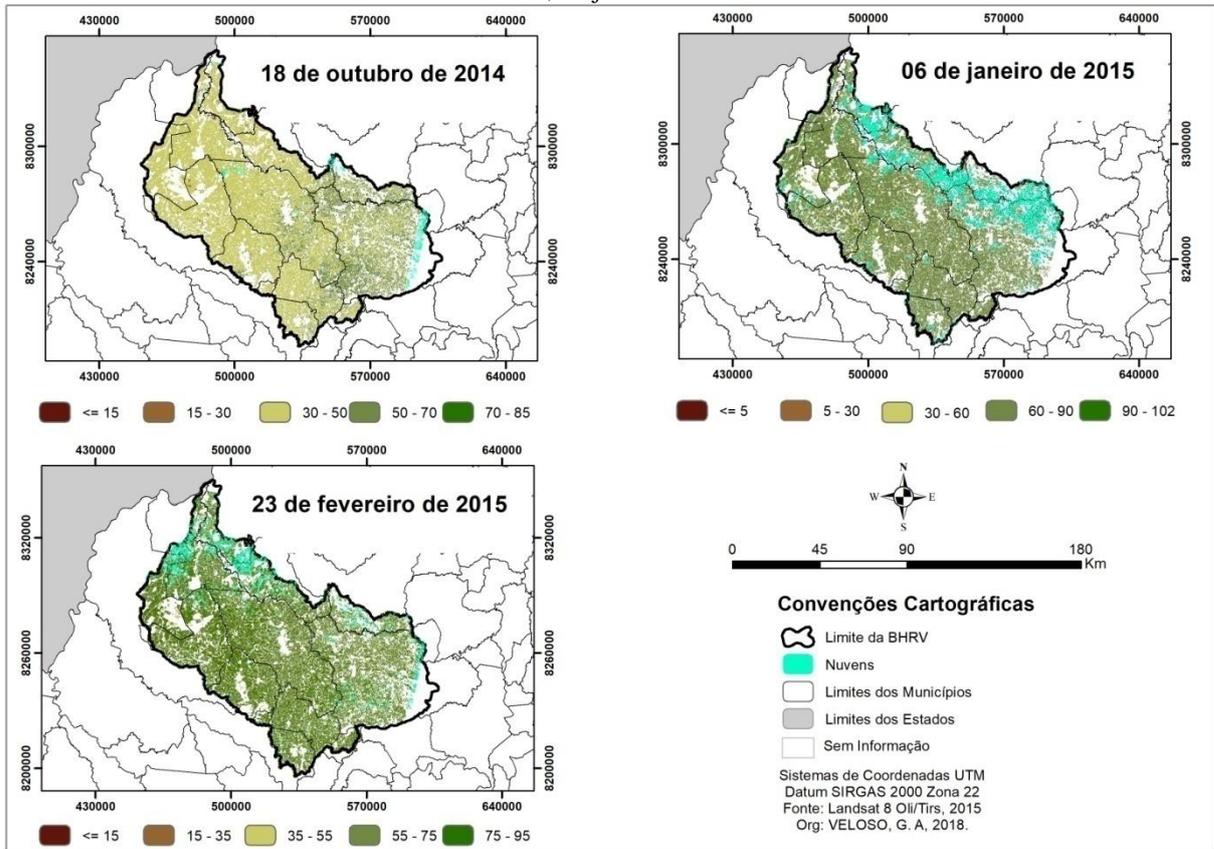
Fonte: autor (2018).

Figura 36 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia⁻¹ método SEBAL/CASA para os dias 17/jul/2015, 18/ago/2015 e 03/set/2015.



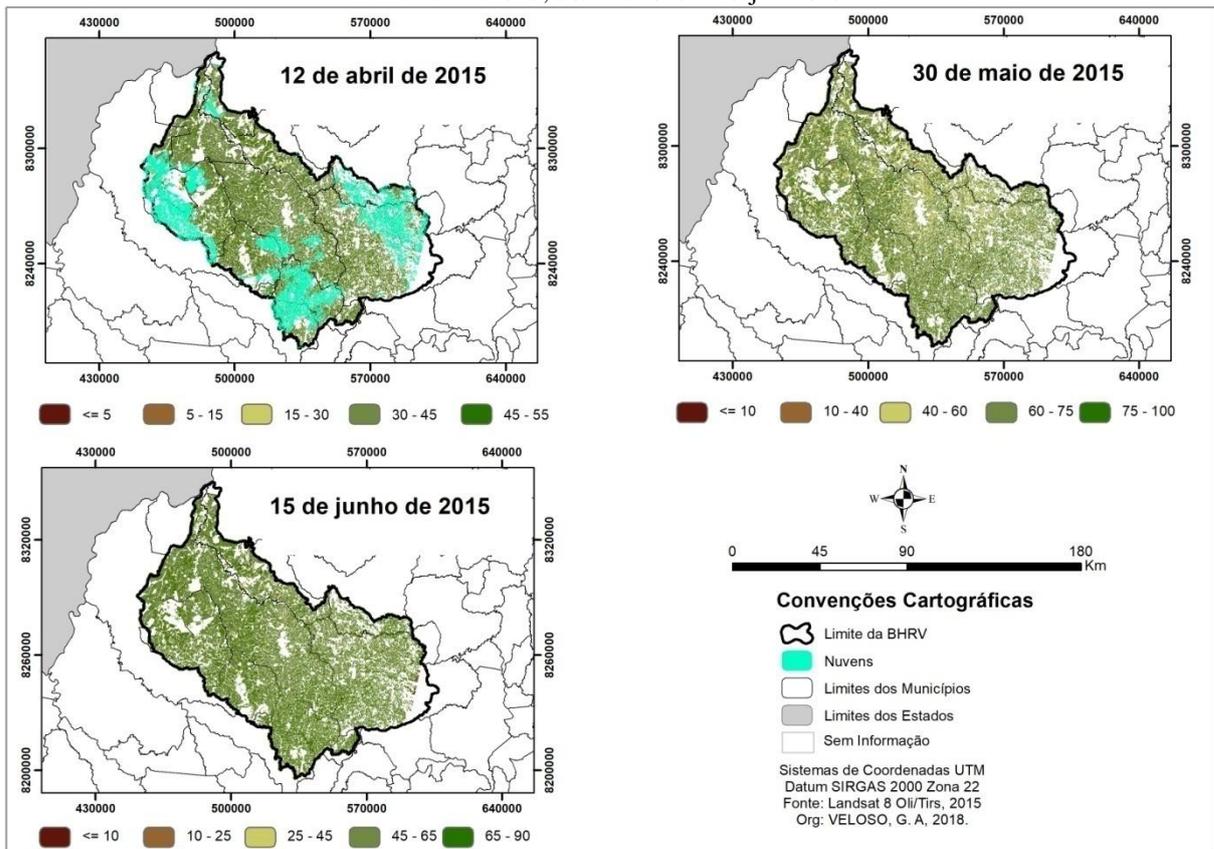
Fonte: autor (2018).

Figura 37 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia⁻¹, pelo método MOD17 (L8) para os dias 18/out/2014, 06/jan/2015 e 23/fev/2015.



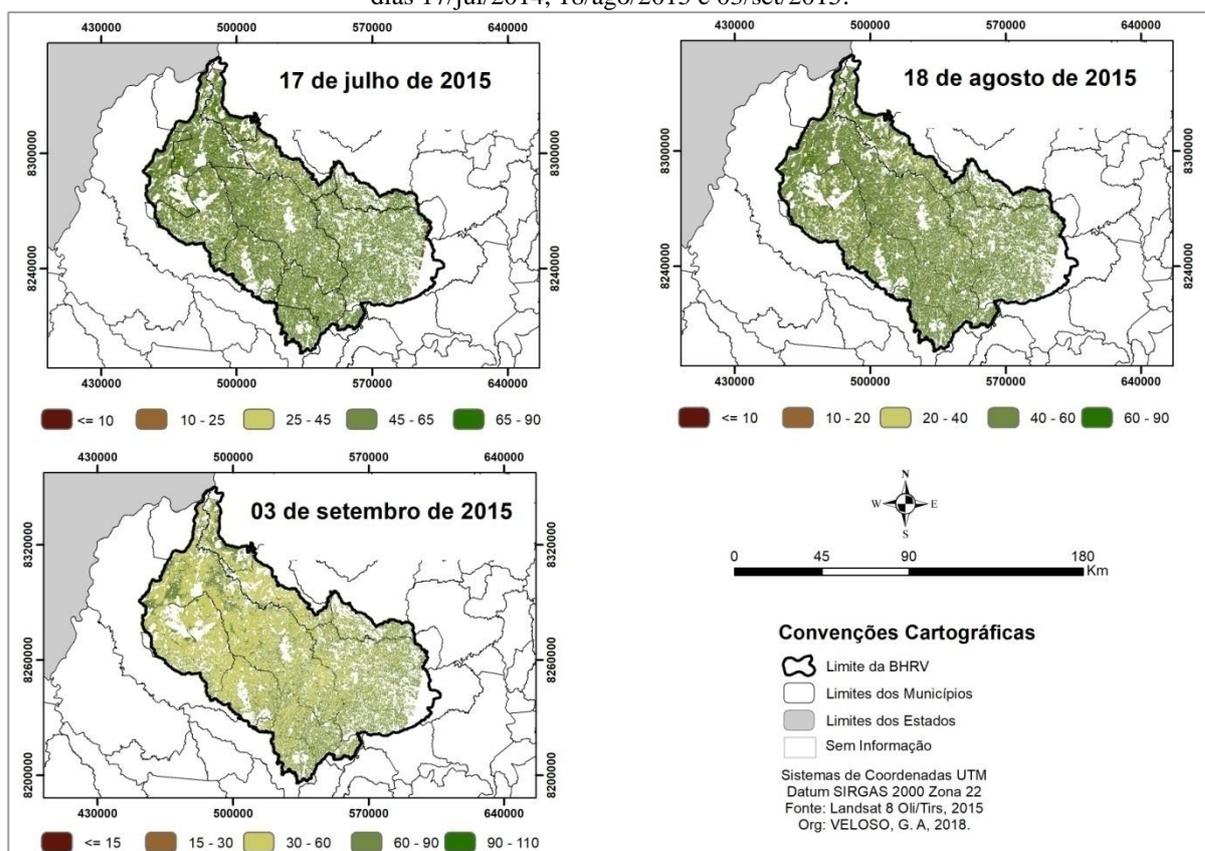
Fonte: autor (2018).

Figura 38 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia⁻¹, pelo método MOD17 (L8) para os dias 12/abr/2015, 30/mai/2015 e 15/jun/2015.



Fonte: autor (2018).

Figura 39 – Biomassa seca nas áreas de pastagens na BHRV em Kg/ha dia⁻¹, pelo método MOD17 (L8) para os dias 17/jul/2014, 18/ago/2015 e 03/set/2015.



Fonte: autor (2018).

Comparando as duas metodologias, os valores médios de biomassa seca observados no período chuvoso não demonstraram significativas diferenças, entretanto, no período de estiagem, a metodologia MOD17 (L8) apresentou valores bem acima do método SEBAL/CASA, principalmente nos meses com maior estresse hídrico, como julho e agosto, com valores médios de 54 e 49 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente. Estes valores foram superiores ao método SEBAL/CASA em aproximadamente 45% para essas datas. Este resultado está associado com a estimativa da eficiência do uso da luz em cada método, pois no SEBAL/CASA usa-se a fração evaporativa para a contabilização do fator água na assimilação do carbono pela planta na produção de biomassa. No método MOD17 (L8,) o valor de eficiência de uso da luz é calculado com os dados da estação meteorológica relacionados à temperatura mínima do ar e o déficit de pressão de vapor.

Analisando ambos os métodos, foi observada uma taxa de acúmulo médio de 45 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ para o período de estiagem e de 58 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ para o período chuvoso no método SEBAL/CASA.No método MOD17 (L8), o acúmulo médio foi de 57,66 e 57,96 kg MSha⁻¹ dia⁻¹para os períodos de estiagem e chuvoso, respectivamente. Na literatura foram observados resultados semelhantes, como o experimento realizado por Rodrigues *et al.* (2011)

na fazenda experimental do Instituto de Zootecnia, em Nova Odessa (SP), realizado entre novembro de 2010 e junho de 2011, onde encontraram valores médios de acúmulo da forragem de 50,5 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ e o acúmulo total de matéria seca de 10.754,4 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ em 213 dias. Em um estudo realizado por Ferreira e Barioni (2007) foi estimado um acúmulo de matéria seca em pastagens de *Brachiaria* spp. em Cristalina - GO, na ordem de 39,6; 60,7; 36,4 e 17,8 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ respectivamente na primavera, verão, outono e inverno, entre novembro de 2005 e outubro de 2006.

Esses resultados foram menores em relação ao encontrado por Sbrissia (2004), que ao avaliar a taxa de acúmulo de forragem da *Brachiaria brizantha* cv. *Marandu* observou que a mesma variou de 100 até 115 kg de MS ha⁻¹ dia⁻¹. Essas diferenças de valores de acúmulo de biomassa seca podem está relacionados a diversos fatores, como: manejo da pastagem, sistema de pastejo, adubação do solo, tipo e fertilidade do solo, e as condições climáticas para cada área (temperatura do ar, precipitação média e, radiação solar), além do tipo de metodologia empregada (RODRIGUES, *et al.*, 2011).

Para melhor descrever as condições das áreas de pastagens na BHRV e compreender a aplicação dos modelos, foram avaliadas as estimativas de biomassa seca obtidas por imagens de satélite, com dados coletados em campo em cinco propriedades da bacia (Fazenda Jatobá, Fazenda Ajuricaba, Fazenda Nossa Senhora das Graças, Estância Paraíso e Fazenda Dois Córregos), com diferentes sistemas de manejo e em diferentes compartimentos (Alto, Médio e Baixo curso).

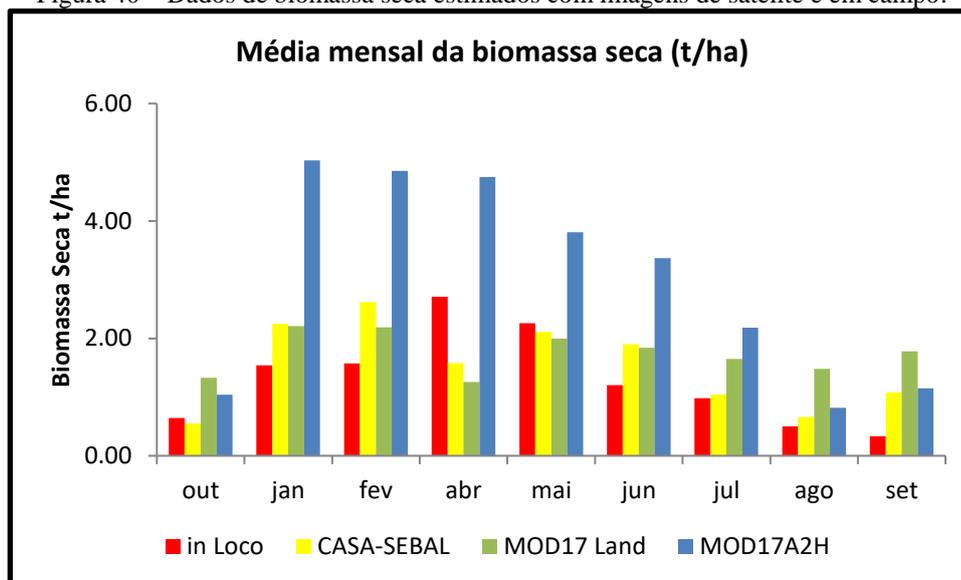
Nestas mesmas propriedades foram coletada biomassa nas áreas de pastagens durante todo o período de estudo (outubro de 2014 a setembro de 2015). Para comparação, foi calculada a média de produtividade de biomassa seca das cinco propriedades para cada mês analisado e comparado com os valores médios obtidos pelos métodos SEBAL/CASA e MOD17 (L8). Além disso, foi avaliada a estimativa de biomassa seca das áreas de pastagens obtida através do produto MOD17A2H (resolução espacial de 500 metros), com o intuito de avaliar o desempenho deste produto para a BHRV.

A Figura 40 apresenta a variação dos dados estimados pelas imagens de satélite e pelos dados coletados em campo, sendo que os valores obtidos pelo produto MOD17A2H apresentaram-se superestimados, sobretudo no período chuvoso. Este resultado pode estar associado aos dados de entrada no algoritmo do MOD17A2, no qual indica que o valor de LUE pode ser alto para as áreas de pastagens no Cerrado, bem como os dados meteorológicos GMAO podem ocasionar possíveis erros. No entanto, para o período de estiagem os valores

de biomassa seca apresentam significativa redução, apresentando seu valor mínimo no mês de agosto.

Observa-se que mesmo no período de estiagem, os valores obtidos pelo produto MOD17A2H se mantiveram superiores aos observados em campo, apresentando, contudo, menor amplitude entre os dados observados (*in Loco*) e os estimados por imagens de satélite. Os valores estimados com as imagens do Landsat 8 (Métodos SEBAL/CASA e MOD17 (L8)) ficaram mais próximos dos obtidos em campo, apresentando uma discrepância no mês de abril (data 12 de abril de 2015), podendo este resultado ter sido influenciado pela alta nebulosidade deste dia, interferindo na estimativa da biomassa. Este fato demonstra que as condições atmosféricas de alta nebulosidade é um fator limitante na estimativa desses parâmetros com imagens de satélite.

Figura 40 – Dados de biomassa seca estimados com imagens de satélite e em campo.



Fonte: LAPIG, 2015 e autor, 2018.

Para a análise do desempenho dos métodos aplicados nesta pesquisa (SEBAL/CASA e MOD17 (L8)) e do produto MOD17A2H, foram estimados os parâmetros estatísticos do índice de correlação de Pearson, estimativa do erro absoluto médio, da raiz do erro quadrático médio e do índice de concordância de Willmott, levando-se como referência os dados obtidos em campo.

Na Tabela 10 observa-se que os parâmetros estatísticos de correlação de Pearson e concordância de Willmott apresentaram resultados mais satisfatórios para o produto MOD17A2H do que para o método MOD17 (L8). No entanto, os valores dos erros observados no método MOD17 (L8) foram inferiores àqueles observados no produto MOD17A2H - este último apresentou erros significativos em relação aos observados em campo. Willmott (1981) ressalta

que nem sempre uma elevada correlação indica boa precisão do modelo em estimar determinada variável de interesse. Dessa forma, o método MOD17 (L8) pode ser considerado mais eficiente que o produto MOD17A2H em estimar a biomassa da pastagem na BHRV, por ter apresentado erros significativamente menores.

Tabela 10—Índices de correlação de Pearson, erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e índice de concordância de Willmott (d) para áreas de pastagem da BHRV.

Métodos	Correlação de Pearson	EMA t/ha	REQM t/ha	d
SEBAL/CASA	0,633	0,228	0,665	0,754
MOD17 Landsat 8	0,119	0,444	0,906	0,376
MOD17A2H	0,833	1,858	2,133	0,483

Fonte: autor (2018).

O método SEBAL/CASA demonstrou ser o mais eficiente na estimativa da biomassa seca na BHRV, apresentando os menores erros e bons índices de correlação e concordância. Outra maneira de avaliar o desempenho dos métodos na estimativa da biomassa seca é relacioná-la com a capacidade de suporte destas áreas de pastagem, ou seja, a capacidade de produtividade animal (ganho de peso) depende intrinsecamente das pastagens.

Além disso, a estimativa da capacidade de suporte é um importante parâmetro na gestão dessas áreas, podendo auxiliar em um uso mais eficiente e sustentável das pastagens, com práticas de manejo mais adequadas para cada ambiente. O manejo dessas áreas baseia-se na frequência e severidade do pastejo, no qual o controle da pressão deste é um dos principais fatores que afetam a condição ecológica dos ecossistemas de pastagens e o nível de produção animal, podendo ser usado como uma tática no intuito de atingir a sustentabilidade ecológica.

Além disso, a determinação da capacidade de suporte é significativa importância, visto que a compreensão de sua variabilidade espacial e temporal auxilia em um melhor planejamento destas áreas, no intuito de maximizar a produtividade, sem degradar o pasto (CROWDER, 1985; EUCLIDES e EUCLIDES FILHO, 1997).

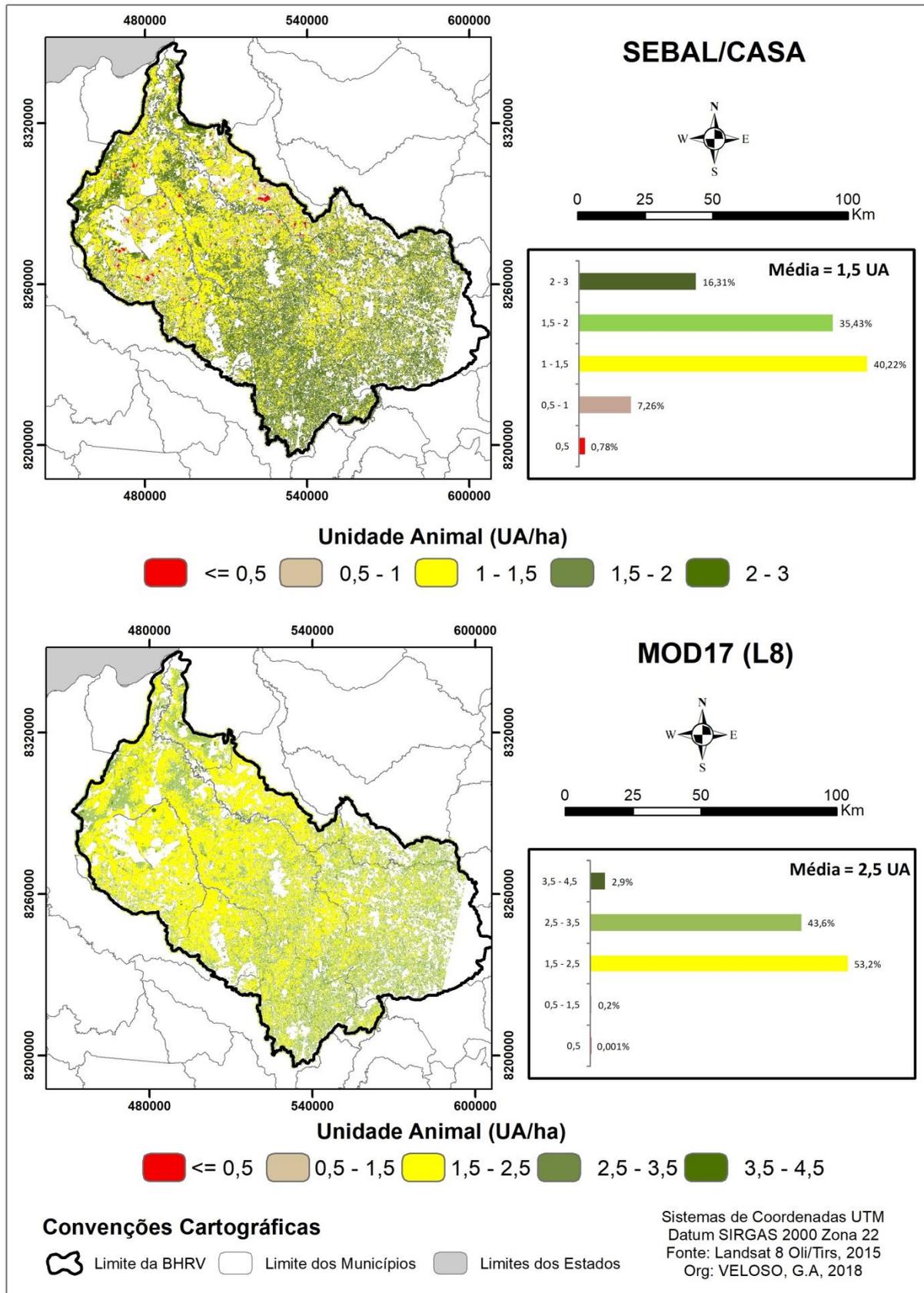
Portanto, a capacidade de suporte foi obtida a partir da relação entre a biomassa seca estimada e a demanda de pastagem para uma unidade (1 UA = 450 Kg), a qual corresponde a duas vezes ao seu consumo. Arantes *et. al.*, (2017) discute que a ingestão diária de matéria seca é, em média, de 2,5% do peso vivo animal (450 Kg), isto é, 11,25 Kg de matéria seca, e que a demanda de forragem precisa ser duas vezes maior do que o consumo, uma vez que

parte da forragem disponível não é utilizada (pisoteado). Deste modo, é necessário dividir o consumo de matéria seca pela eficiência da colheita, obtendo uma demanda diária de 22,5 kg de matéria seca para um animal com peso médio de 450 Kg (ANDRADE, *et al.*, 2017).

Dessa forma, foi calculada a capacidade de suporte na BHRV (Figura 41) com as metodologias SEBAL/CASAe MOD17 (L8), sendo que na primeira foi observada variação de 0,5 a 3 unidade animal (UA), com predominância entre as classes de 1 e 1,5 UA/ha (40,22% das áreas de pastagens) e entre as classes de 1,5 e 2 UA/ha (35,43 % das áreas de pastagens) para o período analisado, apresentando valor médio de 1,5 UA/ha.

Na metodologia MOD17 (L8) foi observado valores mais elevados, variando de 0,5 a 4,5 UA/ha, com valores prodominantes na classe de 1,5 a 2,5 UA/ha (53,2% das áreas de pastagens) e entre 2,5 a 3,5 UA (43,6% das áreas de pastagens), apresentando valor médio de 2,5 UA/ha.

Figura 41 – Unidade Animal para as pastagens na BHRV, avaliadas no período dessa pesquisa.



Fonte: autor, 2018.

Os dados estimados de UA/há pelo método SEBAL/CASA apresentaram maior variação espacial, com os maiores valores no alto curso da BHRV, enquanto no baixo curso os valores predominantes de unidade animal (UA/ha) foram na classe de 1 a 1,5 UA/ha. O método MOD17 (L8) seguiu o mesmo padrão, onde os valores mais elevados de UA/ha são encontrados no alto curso da bacia, enquanto que os menores valores foram observados no médio e baixo curso da BHRV. Em comparação, o valor médio de biomassa seca obtido pelo produto MOD17A2H foi de 3,6 UA/ha para a BHRV.

Parente *et al.*, (2017), também estimaram a taxa de lotação animal por hectare em 2015 para a BHRV, utilizando dados do censo agropecuário do IBGE e dos mapeamentos de pastagens realizados na UFG/LAPIG. Os valores mais altos de UA/ha (1,19) foram encontrados no alto curso, enquanto que os valores mais baixos (0,98 UA/ha) foram observados no baixo curso, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Taxa de lotação animas ou unidade animal por hectare na BHRV para o ano de 2015.

BHRV	Total de Pastagem (2015)	Rebanho 2015	Taxa de Lotação (UA/ha)	SEBAL/CASA (UA/ha)	MOD17 (L8) (UA/ha)
Alto	231.467	475,290	1,19	1,6	2,7
Médio	332976	580,193	1,05	1,4	2,5
Baixo	563166	890,233	0,98	1,3	2,3
Total/Média	1.127,609	1.945,716	1,07	1,5	2,5

Fonte: IBGE, 2017; PARENTE *et al.*, 2017; OLIVEIRA, 2017.

Este resultado obtido por Parente *et al.*(2017) corroboram com os encontrados nesta pesquisa, demonstrando a eficiência dos métodos na estimativa da capacidade de suporte das áreas de pastagens, sendo uma ferramenta importante para uma gestão mais eficiente dos recursos naturais e produtividade na pecuária.

4.6 – Estimativa da GPP e Biomassa Seca em Áreas de Pastagens no Estado de Goiás

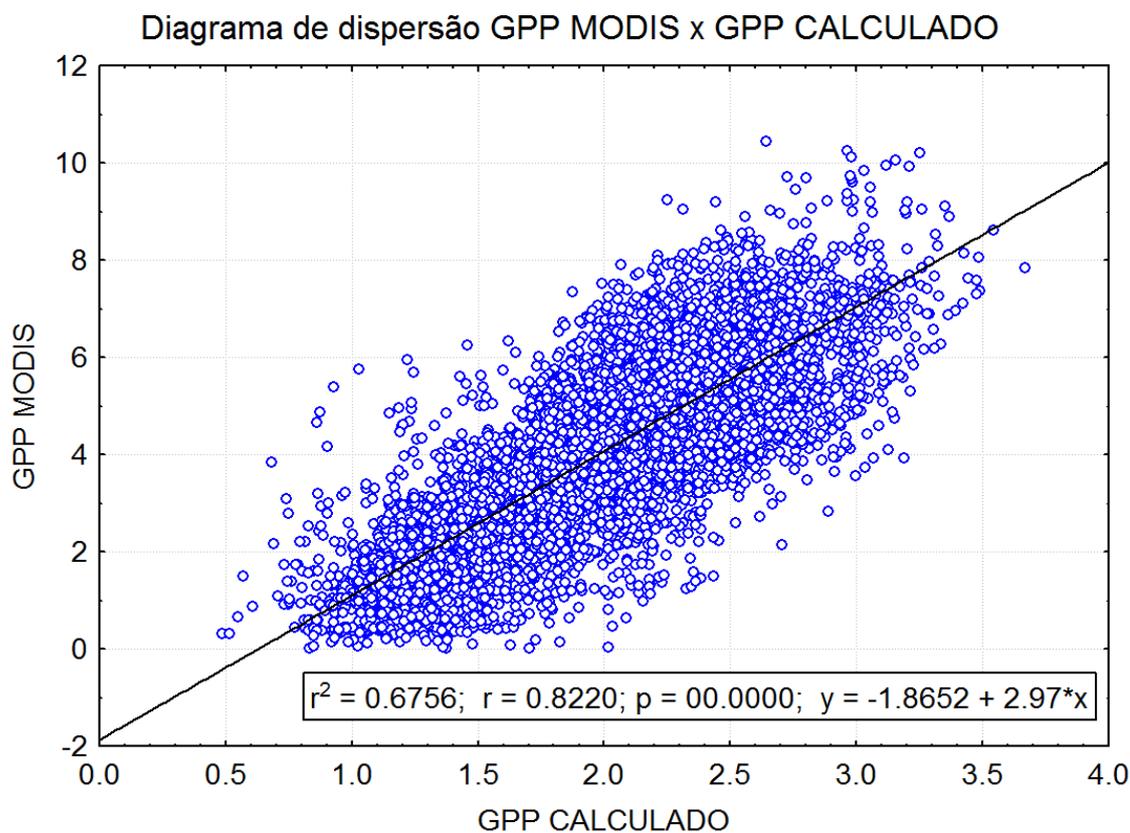
A partir das imagens de NDVI do produto MOD13Q1, dados climáticos locais e parâmetros biofísicos específicos para a *Brachiaria Brizanta* (referente à Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), valores de eficiência de uso da luz (LUE), além da Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FPAR)), foi possível determinar a GPP em áreas de pastagens no Estado de Goiás para o ano de 2014. Ressalta-se que esses procedimentos foram realizados somente em áreas de pastagens, de acordo com o

mapeamento das “Áreas de Pastagens do Brasil” para o ano de 2014, elaborado pela equipe do LAPIG.

O mapa temático das áreas de pastagens no Estado de Goiás utilizado nesta análise está disponível no Apêndice II. Os valores de GPP em áreas de pastagens obtidos nesta pesquisa foram comparados com os valores de GPP do MOD17A2H, no qual apresentou boa correlação, com valores de r de 0,8220 e valores de $p < 0,001$ (Figura 42).

No entanto, os valores obtidos pelo método aplicado nesta pesquisa (MOD17-MOD13Q1H) apresentaram significativa diferença em relação ao produto do MOD17A2H, sendo que neste último os valores foram bem superiores. A variação da GPP em áreas de pastagens pelo produto MOD17A2H apresentou variação entre 0,5 e 10 g C m⁻¹ dia⁻¹, enquanto os valores de GPP obtidos com as imagens de NDVI variou entre 0,5 e 4 g C m⁻¹ dia⁻¹. Essa diferença nos resultados possivelmente está relacionada com os dados de calibração dos modelos, no qual os valores de eficiência de uso da luz - LUE, e os dados climáticos de entrada contêm significativos erros. Além disso, existe a diferença nos mapas base de referência, em virtude do produto MOD17A2H utilizar dados do produto MOD12Q1 como referência de uso e cobertura do solo, com erros de mapeamento, principalmente em áreas de grande heterogeneidade.

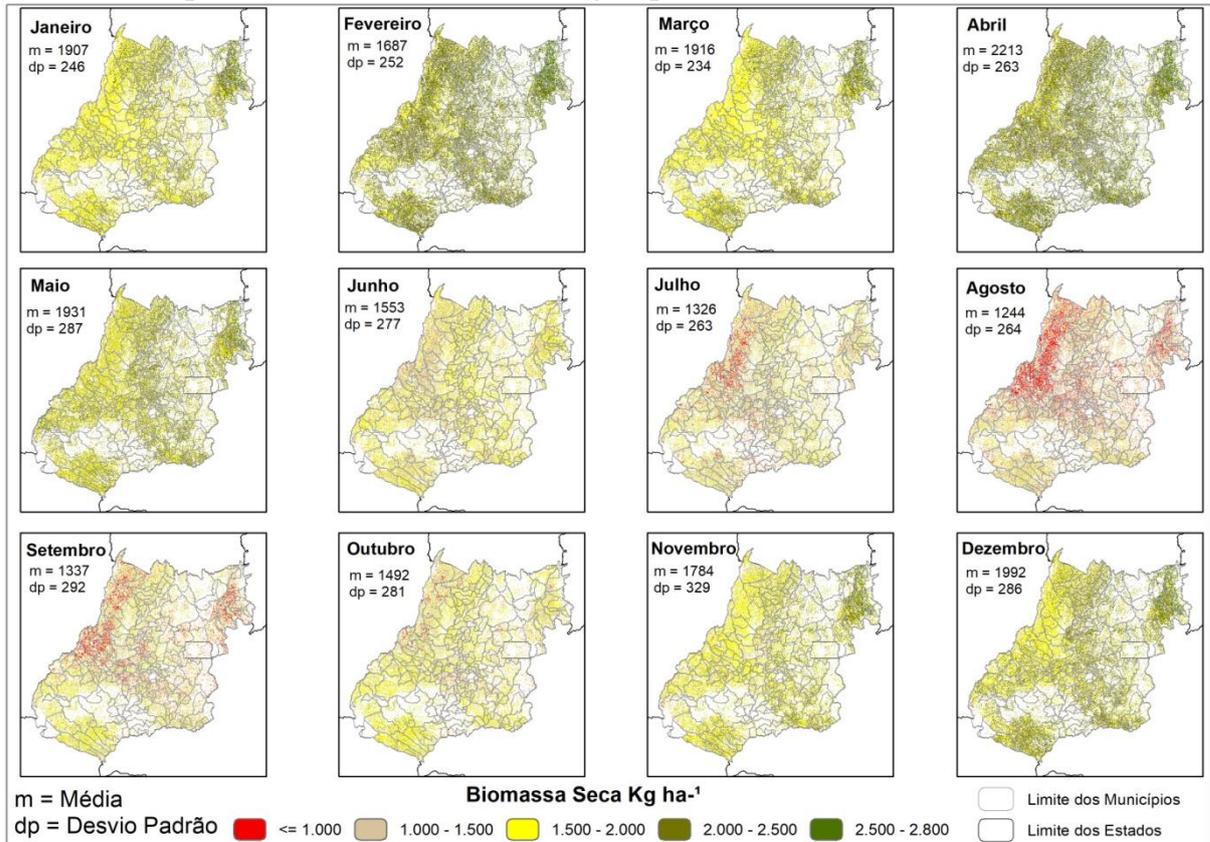
Figura 42 – Correlação entre MOD17A2H e GPP NDVI.



Fonte: autor, 2018.

Portanto, a análise da variação da biomassa seca nas áreas de pastagens no Estado de Goiás foi calculada a partir das imagens de GPP obtidas com metodologia aplicada ao produto MOD13Q1H, com resolução espacial de 250 metros. A análise dessas áreas possibilita um melhor detalhamento das áreas de pastagem, além da calibração do modelo utilizar dados específicos da pastagem *Brachiaria Brizanta* e dados climáticos locais. A Figura 43 apresenta os mapas temáticos com a variação da biomassa seca nos doze meses do ano de 2014, apresentando valores crescentes nos meses de janeiro até abril (quando atingiu os maiores valores), e redução a partir do mês de maio, chegando aos menores valores no mês de agosto, e voltando a apresentar valores crescentes no mês de setembro.

Figura 43 – Biomassa Seca em áreas de pastagens do Estado de Goiás – Ano 2014.



Fonte: autor, 2018.

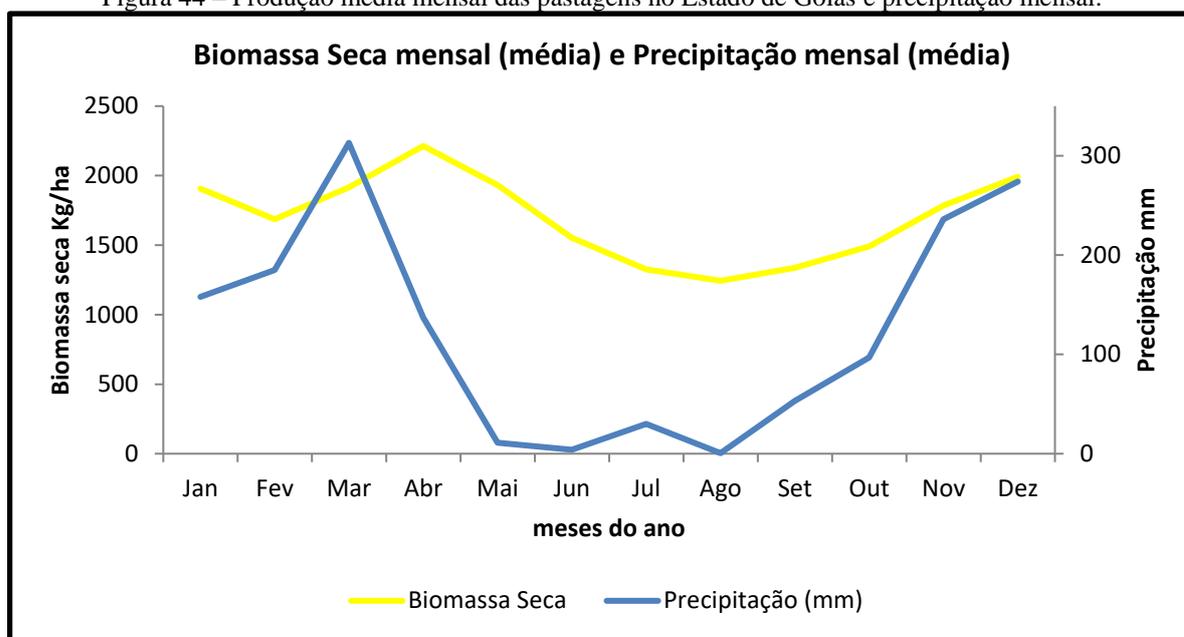
A partir da análise dos mapas, nota-se uma forte influência da sazonalidade climática nas áreas de pastagens, apresentando duas estações bem definidas, sendo uma de estiagem que se inicia em abril até setembro e outra chuvosa, de outubro a março. Para o início da estação de estiagem (abril, maio e junho), observa-se uma boa produtividade das áreas de pastagens devido à disponibilidade hídrica no solo, sobretudo no mês de abril, que apresentou os maiores valores de produtividade. Nota-se que esta encontra-se relacionada com a alta disponibilidade de água no solo e temperaturas ótimas, além de grande incidência de PAR, sendo estes fatores determinantes na produção da biomassa.

No entanto, com o prolongamento da estiagem a produção de biomassa é reduzida, atingindo os menores valores no mês de agosto por causa do estresse hídrico no solo. Com a retomada das chuvas em setembro e outubro, a produtividade das áreas de pastagens apresenta crescimento, ainda que inferior ao registrado no início do período de estiagem, devido ainda à baixa disponibilidade de água no solo.

O gráfico da Figura 44 mostra a produção média para cada mês do ano de 2014 das pastagens no Estado de Goiás e a precipitação média mensal, onde é perceptível a influência

da sazonalidade climática nas áreas de pastagens, sendo a disponibilidade dos recursos hídricos um elemento importante nesta produtividade em áreas de Cerrado. Este resultado corrobora com a afirmação de Churkina e Running (1998) de que a disponibilidade hídrica é um fator determinante na produtividade de pastagens do tipo C4 em todo o planeta.

Figura 44 – Produção média mensal das pastagens no Estado de Goiás e precipitação mensal.



Fonte: autor, 2018.

Na análise da distribuição da produtividade das pastagens no Estado de Goiás, observa-se que os valores mais baixos (≤ 1000) apresentaram grande concentração na região noroeste do Estado, principalmente no mês de agosto, sendo este o mês de menor produtividade devido ao prolongamento da estiagem. Este resultado está associado à grande pressão de pastejo dessa região, com um rebanho estimado em 4.843,185 cabeças de gado para o ano de 2014 (LAPIG, 2017), correspondendo aproximadamente 23% do rebanho bovino do Estado.

No entanto, essa região apresenta boa produtividade (valores acima de 1500 kg MS/ha) nos meses chuvosos, até o início do período de estiagem, indicando boa qualidade do pasto, podendo inclusive ser um reflexo dos investimentos do plano ABC do governo federal, uma vez que as mesorregiões do noroeste goiano, seguida da região sul, foi que mais recebeu investimentos para a recuperação das áreas de pastagem degradada no Estado de Goiás (FERREIRA *et al.*, 2014; CINTHIA, 2018). Este argumento corrobora com a afirmação de Yang *et al.* (2016) de que a restauração de áreas de pastagens degradadas na China devido à

eficácia dos programas de proteção ambiental, permitiu o aumento da produtividade nesse país.

De modo geral, a produtividade média das áreas de pastagens no Estado de Goiás foi de aproximadamente 1600 Kg MS/Ha por mês. Estudo realizado por Brito *et al.* (2017) com imagens de NDVI do produto MOD13Q1 para as áreas de pastagem do bioma Cerrado, encontraram valores médios mensais de aproximadamente 2100 Kg/Ha de biomassa verde, além de alta correlação entre os regime de chuvas do Cerrado e a produtividade das pastagens, demonstrando a influência da sazonalidade climática nas respostas biofísicas de produtividade.

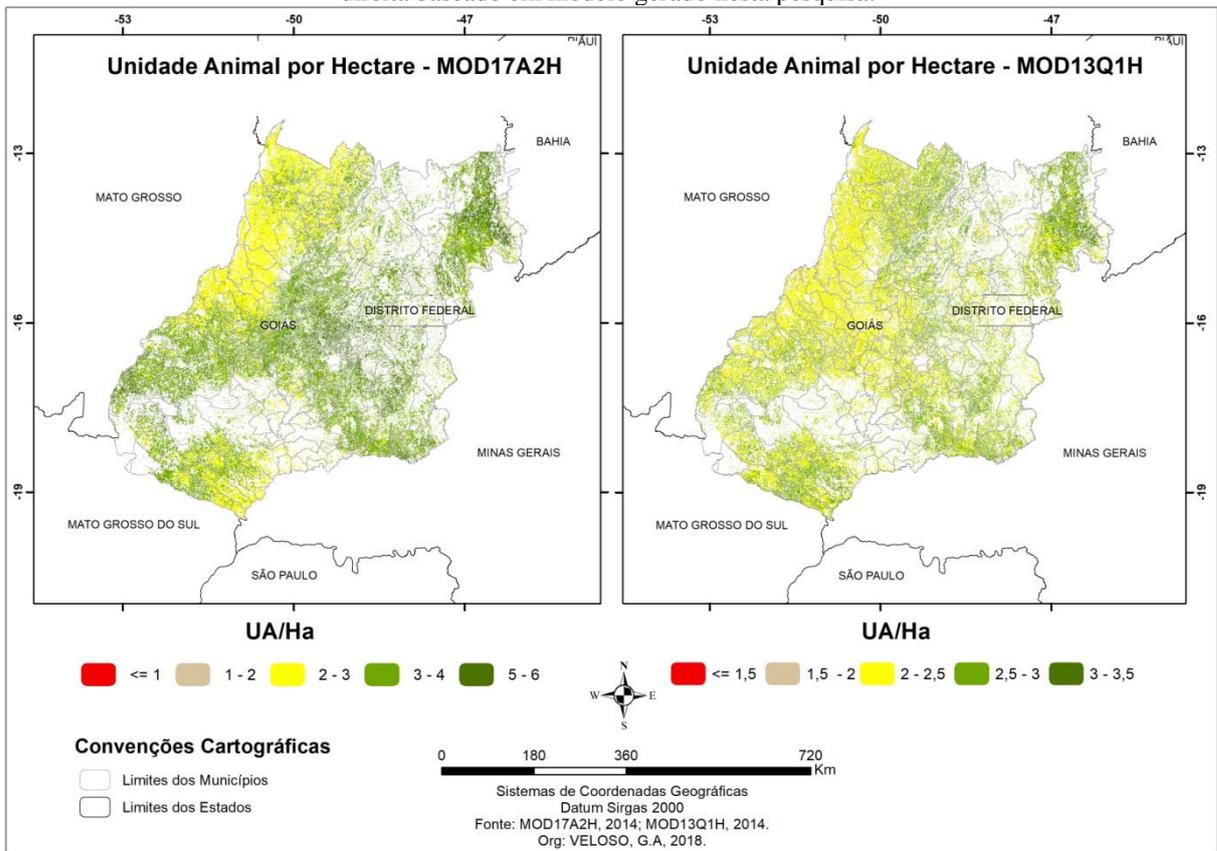
Andrade *et al.*, (2009) em um trabalho realizado com imagens de NDVI obtidas do satélite Landsat 5 TM em áreas de pastagem *Brachiaria Brizanta* na Fazenda Experimental Gado de Corte em Campo Grande – MT, obtiveram valores médios mensais de biomassa seca de 1981 Kg MS/Ha. Rodrigues *et al.* (2011) em um experimento no município de Nova Odessa no Estado de São Paulo, encontraram valores médios de produtividade mensal em pastagens de aproximadamente 1450 Kg MS/Ha por mês. Rosa e Sano (2013), em um estudo realizado na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, em Minas Gerais, indicaram uma produtividade média de aproximadamente 1000 Kg MS/Ha por mês. Essas diferenças podem estar relacionadas a vários fatores, como a fertilidade do solo, capacidade do solo em armazenar água e padrões de temperatura e precipitação específicos de cada local.

Analisando os padrões de produtividade na estação chuvosa e na estiagem para o estado de Goiás, não foi observado significativa diferença de produtividade, sendo que no período chuvoso a produtividade média foi de 10778 Kg MS, enquanto no período de estiagem foi registrado um valor de 9604 Kg MS/ha. Este resultado está relacionado com a disponibilidade de água no solo, pois no início do período de estiagem (abril, maio, junho), as áreas de pastagem mantêm boa produtividade, sendo observada uma redução mais significativa nos meses de julho e agosto devido o estresse hídrico, em virtude dos baixos índices de precipitação. Ao contrário, no início do período chuvoso, no mês de outubro a produtividade das áreas de pastagem apresenta crescimento em relação ao período anterior, no entanto este é inferior ao observado no início do período de estiagem (ainda sob efeito dos meses de chuva), devido à disponibilidade hídrica no solo.

A partir da biomassa seca é possível determinar a capacidade de suporte das áreas de pastagens no Estado de Goiás. A Figura 45 apresenta a variação da taxa de lotação obtida com as imagens de NDVI do produto MOD13Q1 e a taxa de lotação estimada com o produto MOD17A2H de 500 metros. Cabe ressaltar que a estimativa deste parâmetro é de fundamental

importância para o planejamento dessas áreas, uma vez que informações espaciais podem auxiliar para formulação de políticas públicas com o objetivo de aumentar a capacidade de suporte das pastagens (quantidade de animal por hectare). Dessa forma, um melhor desempenho do setor agropecuário está intrinsecamente ligado ao aumento da produtividade das pastagens, sendo este estimado em torno de 1,2 unidade animal/hectare (UA/ha) para a maioria das regiões do Estado de Goiás (EUCLIDES FILHO *et al.*, 1997).

Figura 45 – Unidade Animal para o Estado de Goiás – Ano 2014, observada por dois modelos, sendo o mapa da direita baseado em modelo gerado nesta pesquisa.



Fonte: MOD17A2HH, 2014 e MOD13Q1H, 2014.

Observa-se que a estimativa obtida pelo produto MOD17A2H, apresentou variação entre ≤ 1 a 6 UA/ha com valores médios de 5,2 UA/ha para as áreas de pastagens do Estado de Goiás. Acredita-se que, dificilmente, a área de pastagem no Estado de Goiás possa ter essa capacidade de suporte, pois não há registros na literatura de valores tão elevados de UA/ha para este Estado. Portanto, os valores obtidos pelo produto MOD17A2H são estão superestimados, uma vez que a estimativa da biomassa seca não leva em consideração as condições climáticas e de eficiência de uso da luz específicas para a pastagem do Cerrado goiano; além disso, as imagens deste produto apresentam resolução especial de 500 metros,

onde podem ocorrer “misturas” de classes de uso solo, bem como o mapa base de referência deste (MOD12Q1) apresentar significativos erros em áreas de grande heterogeneidade.

Dessa forma, é de fundamental importância a avaliação deste produto com estimativas mais detalhadas e que leve em consideração os aspectos climáticos e biofísicos como a eficiência de uso da luz. Assim, o mapa de capacidade de suporte bovino estimado com as imagens do produto MOD13Q1H, calibrado com dados de eficiência de uso da luz para a pastagem *Brachiaria Brizanta* e dados climáticos locais, apresentou variação entre $\leq 1,5$ e 3,5 UA/ha, e com valores médios próximo de 2,5 UA/ha, sendo este mais próximo da realidade das áreas de pastagens do cerrado goiano.

Nota-se que os maiores valores foram observados, principalmente, nas porções centrais, sul e extremo nordeste do estado, enquanto que os valores mais baixos ocorreram predominantemente nas porções norte e noroeste do estado (depressão do rio Araguaia). No entanto, na porção noroeste encontram-se valores de UA/ha entre 2,5 e 3, sobretudo no município de São Miguel do Araguaia, Novo Mundo, Novo Planalto, Novo Crixás, Bonópolis (no extremo noroeste), podendo este resultado estar relacionado com as políticas do plano ABC para a recuperação de áreas com pastagens degradadas.

Os valores mais elevados de UA foram registrados na região nordeste do estado, tanto no método aplicado nesta pesquisa (com as imagens MOD13Q1) e na estimativa realizada com o produto do MOD17A2H. Ressalta-se que esta é uma região de fronteira agrícola no cerrado goiano, além disso, é uma área que apresenta muitas ondulações no relevo, no qual podem ter ocorrido erros no mapeamento das áreas de pastagens. Acreditamos que os valores dessa região encontram-se superestimados, havendo a necessidade de mais estudos nesta área.

Outro fator importante é o tipo de solo. De acordo com Garcia *et al.* (2013) as pastagens do cerrado goiano encontram-se predominantemente em áreas de Latossolos, em relevos de formas residuais de superfícies de aplainamento, apresentando topografia plana. Mais de 95% deste tipo de solos são distróficos e ácidos, sendo que, quando mal manejados, estão sujeitos à alta erodibilidade, devido à sua estrutura granular, necessitando em muitos casos de correções para manter a produtividade das pastagens.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa evidenciam o potencial do uso de imagens de sensoriamento remoto para a estimativa de dados biofísicos em áreas de pastagem, tais como a Produtividade Primária Bruta (GPP), Evapotranspiração Real (ETR), Saldo de Radiação (Rn), bem como estimativas de produtividade das pastagens, como Biomassa Seca e capacidade de suporte bovino, por Unidade Animal/Hectare. A análise destes dados com a utilização de imagens de satélite possibilitou um acompanhamento contínuo desses parâmetros nas áreas de pastagens do cerrado goiano e mais detalhadamente na BHRV, diferentemente das análises que utilizam estações meteorológicas e dados de biomassa obtidos em campo, normalmente restritos à análises pontuais.

A estimativa da ETR em áreas de pastagens da BHRV, com o uso das imagens do satélite Landsat 8 e a aplicação o algoritmo SEBAL, apresentou boa correlação com os dados de evapotranspiração encontrados na literatura em áreas de pastagem. A técnica aplicada possibilitou identificar diferenças nos elementos do balanço de energia e evapotranspiração no interior da cena de estudo, possibilitando uma maior compreensão da variação espacial e temporal desses parâmetros nas áreas de pastagens na BHRV. A evapotranspiração real diária (equivalente a 24 horas) apresentou variação de 0 a 5 mm.dia⁻¹ no período analisado. Essa variação pode ser explicada pela quantidade de energia disponível para o processo evaporativo, associado à disponibilidade hídrica, sendo perceptível a influência da sazonalidade climática nos componentes do balanço de energia e evapotranspiração nas áreas de pastagem. Além disso, a ETR pode é um bom parâmetro de qualidade do pasto, no qual as áreas com maior ETR indicam alta atividade fotossintética e produção de biomassa.

O saldo de radiação na BHRV apresentou variação de 350 a 700 W/m⁻² no período analisado. Esta variação pode ser explicada pela quantidade de energia disponível (radiação solar incidente), sendo perceptível a influência da sazonalidade climática nos componentes do balanço de radiação nas áreas de pastagem. No entanto, a variação do saldo de radiação é influenciada também pelos níveis de degradação das áreas de pastagem, que possuem baixos valores de Rn.

Quanto à análise da GPP na BHRV, o método SEBAL/CASA foi o que demonstrou maior eficiência neste cálculo, ao detectar com melhor detalhe a influência da sazonalidade climática na variação espacial e temporal deste parâmetro. Para este método, a GPP apresentou variação entre 0,02 e 4,6 g C m⁻¹ dia⁻¹, onde os maiores valores foram registrados nos meses do período chuvoso e apresentando redução com o prolongamento da estiagem

(com os menores valores no mês de agosto). Nota-se que a disponibilidade hídrica é um fator determinante na GPP em áreas de pastagem no bioma Cerrado.

A estimativa da GPP pelo método MOD17 (L8) demonstrou ser menos sensível à sazonalidade climática da BHRV. Apesar de apresentar redução da GPP no período de estiagem, estes valores foram maiores que os do método anterior (SEBAL/CASA), sendo este resultado associado com a estimativa da eficiência de uso da luz – LUE. Isso porque, no método SEBAL/CASA, leva-se em consideração o fator água expresso no modelo como a fração evaporativa. Tendo em vista que as áreas de pastagens no bioma cerrado sofrem forte influência da disponibilidade hídrica, este é um fator importante para ser levado em consideração nas análises da GPP neste bioma. Dessa forma, constatou-se nesta pesquisa que a disponibilidade hídrica é o principal fator climático que influencia a sazonalidade do sequestro de carbono em áreas de pastagem no cerrado goiano. Visto que, a disponibilidade de PAR e de temperaturas ideais para o desenvolvimento da planta, não demonstraram como fatores limitantes.

Em relação ao potencial de sequestro de carbono em áreas de pastagens no Cerrado goiano, foi observado na BHRV, por meio do método SEBAL/CASA um potencial médio de $4,8 \text{ Mg Há}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, demonstrando o grande potencial dessas áreas em sequestrar o carbono atmosférico.

Em relação à biomassa seca, o método que apresentou resultados mais satisfatórios na BHRV foi o SEBAL/CASA, apresentado boa correlação com a biomassa coletada em campo. Igualmente, este método apresentou o menor erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e um bom índice de concordância de Willmott (d). A biomassa seca estimada com o produto do MOD17A2H para as áreas de pastagens da BHRV apresentou boa correlação, ainda que observados erros elevados. Além disso, os dados estimados de biomassa seca com este produto na BHRV foram significativamente superestimados principalmente nos meses do período chuvoso, podendo este resultado estar associado aos valores de LUE adotados nesta metodologia, bem como erros relacionados aos parâmetros climáticos (baixa resolução espacial) no mapa de referência do MOD12Q1.

Dessa forma, constatou-se a importância da calibração desses modelos para as estimativas mais coerentes da biomassa seca, sendo que a utilização da eficiência de uso da luz – LUE específica para a *Brachiaria Brizanta*, a utilização de um mapeamento detalhado das áreas de pastagens para a BHRV, bem como a utilização de dados climáticos locais reforça a tese de melhor precisão nessas estimativas.

Em relação à estimativa da Unidade Animal (UA) na BHRV com as imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS(CASA/SEBAL e MOD17 Landsat 8), observou-se que os dados são mais condizentes com a realidade na bacia, apresentando coerência na variação espacial e com as informações encontradas na literatura. No entanto, a UA/ha média estimada pelo método do MOD17A2H demonstrou-se superestimada, não caracterizando bem a realidade desta bacia, sendo o resultado associado à alta resolução espacial e aos dados de calibração do modelo. Ademais, a adaptação dessas metodologias em imagens de média resolução espacial como o Landsat 8, sensor OLI/TIRS, possibilita a análise desses parâmetros de forma mais detalhada, podendo auxiliar na gestão dessas áreas em escala de propriedade rural, sendo um boa ferramenta na compreensão dessas variáveis.

Na avaliação da GPP em áreas de pastagens no Cerrado goiano, com metodologia aplicada as imagens do produto MOD13Q1H, esta apresentou boa correlação com o produto MOD17A2H, no entanto, os valores estimados por este último método demonstrou-se superestimado em relação ao primeiro. Este resultado está relacionado com os dados de calibração, pois no método aplicado nesta pesquisa utilizou dados de calibração específicos para as áreas de pastagens do cerrado goiano, tais como LUE, PAR, FPAR e dados climáticos locais. NA avaliação da estimativa da biomassa seca, os dados obtidos pelas imagens do MOD13Q1H foram mais coerentes com as áreas de pastagens do cerrado goiano, no qual descreveu melhor a variação da produtividade das pastagens no Estado, bem como dados mais coerentes de UA/ha. No entanto, ainda é necessário mapeamentos mais detalhados das áreas de pastagens do cerrado goiano, sobretudo na região nordeste do estado, no qual podem ter ocorrido possíveis erros de mapeamento.

Ademais, percebe-se que a metodologia utilizada nesta pesquisa para a estimativas dos parâmetros biofísicos, bem como com imagens de melhor resolução espacial (MOD13Q1H para o Estado de Goiás e Landsat 8 OLI/TIRS para a BHRV) demonstrou-se mais eficiente. Dessa maneira os resultados poderão auxiliar na gestão e tomada de decisão dessas áreas de pastagens, pois demonstrou de forma mais detalhada a variação espacial e temporal dos componentes.

Por fim, recomendam-se mais experimentos que investiguem a eficiência máxima de diversos tipos de gêneros de pastagens, tais como *Brachiaria*, *Panicum*, *Andropogon* etc., bem como estudos mais detalhados da interação da radiação solar para a produção da biomassa, principalmente parâmetros como o FPAR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, R. G.; BATISTELLA, M.; BARBOSA, R.A.; SEDIYAMA, G. C.; DELGADO, R. C.; LIMA, E. P. Aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto na estimativa da biomassa vegetal de pastagens no Mato Grosso do Sul. In: XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2009, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBA, 2009.
- ARAGÃO, L. E. O. C. **Modelagem dos Padrões Temporal e Espacial da produtividade Primária Bruta Na Região do Tapajós: Uma Análise Multi-Escala.** Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2004.
- ARANTES, A. E. **Caracterização Biofísica (Padrões e Tendências) das Pastagens Brasileiras em Suporte a Intensificação da Pecuária Bovina no Brasil.** Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB). Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2017.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 94, p.321-340, 2003.
- BACCINI, A., S. J. GOETZ, W. S. WALKER, N. T. LAPORTE, M. SUN. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon density maps. **Nature Climate Change**, v.2, p.182-185, 2012
- BEZERRA, M. V. C. **Balanco de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto.** 108f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2004.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Balanco de Energia e Evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de coberturas de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL. Dissertação de Mestrado, p. 28-30, Campina Grande, 2006.
- BORGES, E. F.; SANO, E. E.; MEDRADO, E. Radiometric quality and performance of TIMESAT for smoothing moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index time series from western Bahia State, Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, p. 1-21, 2014.
- BRANDÃO, Z. N.; BEZZERA, M. V. C.; SILVA, B. B.; **Uso do NDVI para a determinação da biomassa na chapada do Araripe.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21 - 26 abril 2007, INPE, p. 75-81.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA 2014. Balanco da Pecuária Bovídea de Corte. Fórum Nacional Permanente da Pecuária de Corte. Disponível em <http://www.canaldoprodutor.com.br/>
- CHAPIN, F. S.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. **PRINCIPLES OF TERRESTRIAL ECOSYSTEM ECOLOGY.** 2 Edição. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011. 546p.

CHURKINA, G.; RUNNING, S. W. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. **Ecosystems**, v. 1, p. 206-215, 1998.

CHEN, B.; ZANG, X.; TAO, J.; WU, J.; WANG, J.; SHI, P.; ZHANG, Y.; YU, C. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 189-190, p 11-18, 2014.

COSTA, K. A. P.; ROSA, B.; OLIVEIRA, I. P.; CUSTÓDIO, D. P.; SILVA, D. C. Efeito da estacionalidade na produção de matéria seca e composição bromatológica da *Brachiaria brizantha* cv. *Marandu*. **Ciência Animal Brasileira**, v. 6, n. 3, p. 187-193, 2005.

DEFRIES, R. S.; LOS, S.O. Implications of land-cover misclassification for parameter estimates in global land-surface models: an example from the Simple Biosphere Model (SiB2). **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 65, n. 9, p. 1083-1088, set. 1999.

DEFRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R.; LOS, S.O. Scaling land cover heterogeneity for global atmosphere-biosphere models. In: Quattrochi, D A.; Goodchild, M.F. (eds). **Scale in Remote Sensing and GIS**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997, Cap. 6., p. 231-246.

DEL'ARCO, J. O.; RIOS, A.; DAMBRÓS, L.; TARAPANOFF, I.; ASS, N. **Diagnóstico ambiental da bacia do rio Araguaia-Trecho Barra do Garças (MT)-Luis Alves (GO)**. AHITAR/IBGE. Goiânia, Brasil, 1999.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4ª Ed. Ed. Do Autor – Belém, PA, 2011.

ECKERT, S.; HÜSLER, F.; LINIGER, H.; HODEL, E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. **Journal of Arid Environments**, v. 113, p. 16-28, 2015.

EITEN, G. Vegetação do Cerrado. In: M. N. Pinto (org.). **Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas**. Editora Universidade de Brasília, Brasília, p. 17-73, 1994..

EMBRAPA. **Aspectos Ecológicos**. 2014. Disponível em:<<http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/aspec.htm>>. Acesso em: 25 outubro. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SBCS**. [Editores Técnico: SANTOS, H. G. et. al.]. – 2ª. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 2006.

EKLUNDH, L; OLSSON, L. Vegetation index trends for the African Sahel 1982–1999. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 8, p. 13-1 – 13-4, 2003.

EUCLIDES FILHO, K.; FIGUEIREDO, G.R.de; EUCLIDES, V.P.B. **Eficiência de produção de vacas de corte com diferentes potenciais para produção de leite**. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.7, p.1003-1007,1995.

EUCLIDES FILHO, V. P. B.; MACEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, M. P. Desempenho animal em pastagens de gramíneas recuperadas com diferentes níveis de fertilização. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 34., 1997, Juiz de Fora. **Anais Brasília: SBZ**, v.2, p.201-203, 1997.

FAO. **The state of food and agriculture: Livestock in balance**. 2009.

FERNANDES, F. H. S. **ESTIMATIVAS DA DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS CULTIVADAS DO CERRADO MINEIRO COM BASE NA TÉCNICA DE EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA (WUE - WATER USE EFFICIENCY)**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas. Universidade Federal de Brasília – UNB, Brasília, 2017.

FERREIRA, L. G.; SOUSA, S. B.; ARANTES, A. E. **Radiografia das pastagens do Brasil: Relatório final**, LAPIG/UFG e SAE/PR, Goiânia, dez. 2014. Disponível em: <http://eco-financas.web1325.kinghost.net/wp-content/uploads/2015/01/relatorio_sae_final-v8_10_12_14.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2016.

FERREIRA, L.G; SANO, E.; FERNANDEZ, L.; ARAÚJO, F. Biophysical characteristics and fire occurrence of Cultivated pastures in the Brazilian savanna observed by moderate resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (1), 154-167. 2012.

FERREIRA, A. C.; BARIONI, L. G. **Monitoramento da massa de forragem e altura para ajustes de taxa de lotação em fazenda agropecuária na região do Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados: 2007. 24 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 191).

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

FRIEDL, M. A. Examining the effects of sensor resolution and sub-pixel heterogeneity on spectral vegetation index: implications for biophysical modeling. In: Quattrochi, DA.; Goodchild, M.F. eds. **Scale in Remote Sensing and GIS**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997, Cap. 6., p.113-136.

FUENTES, D.A.; GAMON, J.A.; CHENG, Y.; Qiu, H.L.; MAO, Z.; SIMS, D.A.; RAHMAN, A.F.; OECHEL, W. e LUO, H. (2006): "Mapping carbon and water flux in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS", *Remote Sensing of Environment*, v.103, pp.312-323.

GAO, Q.; SCHWARTZ, M. K.; ZHU, W.; WAN, Y.; QIN, X.; MA, X.; LIU, S.; WILLIAMSON, M. A.; PETERS, C. B.; LI, Y. Changes in global grassland productivity during 1982 to 2011 attributable to climatic factors. **Remote Sensing**, v. 8, n. 384, p. 1-12, 2016.

GALVANI, E. Avaliação da radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) em São Paulo, SP. **GEOUSP - Espaço e tempo**, São Paulo, nº 25, pp. 155-164, 2009.

GARCIA, F. N; FERREIRA Jr, L. G; SANO, E. E; **ANÁLISE DA QUALIDADE DAS PASTAGENS CULTIVADAS DO CERRADO GOIANO A PARTIR DE IMAGENS**

MODIS ÍNDICE DE VEGETAÇÃO. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 65/6: p. 1075-1086, 2013.

GOETZ, S. J.; PRINCE, S. D.; GOWARD, S. N.; THAWLEY, M. M. e SMALL, J. (1999): “Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modelling approach”, *Ecology Modelling*, v.122, pp.239–255.

GOIÁS (Estado). Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. **Mapa Geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório Final**. Goiânia, 2005.

GUIMARÃES, L. D. A. **Natureza viva: Cerrado: caracterização e conservação**. Goiânia: UCG, 2006, p.21 – 42.

GUSSON, E. **Avaliação de método para a quantificação de biomassa e carbono em florestas nativas e restauradas de mata atlântica**. 2014. 112p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paula, São Paulo.2014.

HERRMANN, S. M.; ANYAMBA, A.; TUCKER, J. C. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. **Global Environmental Change**, v. 15, p. 394-404, 2005.

HUNT, E.R., JR. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, v.15, p.1725-1730, 1994..

KNYAZIKHIN, Y., J. GLASSY, J.L. PRIVETTE, Y. TIAN, A. LOTSCH, Y. ZHANG, Y. WANG, J.T. MORISSETTE, P. VOTAVA, R.B. MYENI, R.R. NEMANI, S.W. RUNNING. 1999. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15) algorithm theoretical basis document. Internet file <http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/ATBD>.

LAPIG – O LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. Mapa Síntese da Área de Pastagem (MSP) para o território brasileiro. Disponível em: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>. Acesso em: 25 outubro 2017.

LAPIG – O LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. Mapa Síntese da Área de Pastagem (MSP) para o território brasileiro. Disponível em: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>. Acesso em: 15 setembro 2016.

LACERDA FILHO, J. V. de; **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Escala 1:500.000**. 2ª edição. Goiânia: CPRM/ METAGO/UnB, 2000.

LATRUBESSE, E. M., RODRIGUES, S. C., MAMEDE, L. **Sistema de classificação e mapeamento geomorfológicos: Uma nova proposta**. *Geosul*. vol. 14 (17), 682-687. 1998.

LEITE, J.F. ; FERREIRA, L. G. . REDD: DESAFIO E OPORTUNIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE POLÍTICA PÚBLICA DE VALORIZAÇÃO DO CERRADO NO ESTADO DE GOIÁS. **Boletim Goiano de Geografia (Online)**, v. 32, p. 205-218, 2012.

LEITE, J. F.; FERREIRA Jr, L. G: REDD: DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE VALORIZAÇÃO DO CERRADO NO ESTADO DE GOIÁS. **Boletim de Geografia**, Goiânia, v. 32, n. 2, p.205-218, 2012.

LILLESAND, T. M; KIEFER, R. W; CHIPMAN, J. W. **Remote Science and image interpretation**. Jhon Wiles & Sons, p – 3-8, 2007.

LIU, S.; WANG, T.; GUO, J.; QU, J.; AN, P. Vegetation change based on SPOT-VGT data from 1998-2007, northern China. **Environment Earth Science**, v. 60, p. 1459-1466, 2010.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2015. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 22 out. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Sistema IBGE de recuperação automática - SIDRA. 2010. <http://www.ibge.br/sidra/> (último acesso em 25/07/2010).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Censo agropecuário 2006. 2006. Disponível em: . Acesso em: 24 jul. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção Agropecuária Municipal 2016. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br>. Acesso em 24 de fev. 2018.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Land use, land use change and forestry**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: The IPCC Scientific Assessment-Report of IPCC Working Group. Cambridge Univ. Press. 1990.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O. R. Aardvoldson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

MA, X.; HUETE, A.; YU, Q.; COUPE, N. R.; DAVIES, K.; BROICH, M.; RATANA, P.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B.; CLEVERLY, J.; BOULAIN, N.; EAMUS, D. Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 97-115, 2013.

MA, X.; HUETE, A.; CLEVERLY, J.; EAMUS, D.; CHEVALLIER, F.; JOINER, J.; POULTER, B.; ZHANG, Y.; GUANTER, L.; MEYER, W.; XIE, Z.; CAMPOS, G. P. Drought rapidly diminishes the large net CO₂ uptake in 2011 over semi-arid Australia. **Scientific Reports**, v. 6, n. 37747, p. 1-9, 2016.

MACHADO, P. M. **SÉRIES TEMPORAIS DO MODIS EM PASTAGENS CULTIVADAS DO CERRADO: COMPARAÇÃO COM DADOS ESPECTORRADIOMÉTRICOS DE CAMPO**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação Geociências Aplicadas. Universidade Federal de Brasília – UNB, Brasília, 2014.

MCKANE, R. B.; RASTETTER, E. B.; MELILLO, J.M.; SHAVER, G. R.; HOPKINSON, C. S.; FERNANDES, D. N.; SKOLE, D. L.; CHOMENTOWSKI, W. H. Effects of global change on carbon storage in tropical forests of South America. *Global Biogeochemical Cycle*, v.9, n. 3, p. 329-350, 1995.

MEIRELLES, M. L., FARIAS, S. E. M., FRANCO, A. C. **Balanco de energia de uma pastagem cultivada no cerrado, 2003**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Cerrados. Planaltina, DF. 14p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA); Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA). Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA / MDA, 2011.

MCWILLIAM, J. R. Response of pasture plants to temperature. In: WILSON, J. R. (Ed.). **Plant Relation in Pasture**. Melbourne: CSIRO, 1978. p. 17-34.

MOD17 User's Guide. 2015. *User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm*. Montana, University of Montana. 57p.

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

MOYSÉS, A.; SILVA, E. R. da. **Ocupação e urbanização dos cerrados: desafios para a sustentabilidade**. Cadernos Metrópole, 20 pp. 197-220, 20 sem. 2008.

MYNENI, R. B.; HOFFMAN, S.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J. L.; GLASSY, J.; TIAN, Y.; WANG, Y.; SONG, X.; ZHANG, Y.; SMITH, G. R.; LOTSCH, A.; FRIEDL, M.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v.83, p.214–231, 2002.

NEUMANN-COSEL, L.; ZIMMERMANN, B.; HALL, J. S.; van BREUGEL, M.; ELSENBEEER, H. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures – A case study from Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 10, p. 1625-1633, 2011. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA- FAO. *The State of Food Insecurity in the World 2009*.

PAIVA, C. M.; FERNANDES, R. F.; **Estudo da Produtividade Primária do Bioma Mata Atlântica via Sensoriamento Remoto**. Anuário do Instituto de Geociência - UFRJ. v. 38-2. p. 15-14, 2015.

PARENTE, L.; FERREIRA, L.; FARIA, A et al. Monitoring the Brazilian pasturelands: A new mapping approach based on the Landsat 8 spectral and temporal domains. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 62, p. 135-143, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.06.003>

PARIS, W.; CECATO, U.; BRANCO, A. F.; BARBERO, L. M.; GALBEIRO, S. Produção de novilhas de corte em pastagem de Coastcross-1 consorciada com Arachispintoi com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 38, n. 1, p. 122-129, 2009.

PLANO NACIONAL SOBRE MUDAÇAS NO CLIMA - PNMC; GOVERNO FEDERAL, NOVEMBRO DE 2007.

PINHEIRO, ALYSON ANDRADE; CECATO, U. ; LINS, T. O. J. D. ; BELONI, T.; PIOTTO, V. C. ; BEIRO, O. L. . Produção e valor nutritivo da forragem, e desempenho de bovinos Nelore em pastagem de capim-Tanzânia adubado com nitrogênio ou consorciado com estilozantes Campo Grande. *Semina. Ciências Agrárias* (Online), v. 35, p. 2147, 2014.

POTTER, C. S.; DAVIDSON, E. A.; KLOOSTER, S. A.; NEPSTAD, D. C.; De EGREIROS, G. H.; BROOKS, V. Regional application of an ecosystem production model for studies of biogeochemistry in Brazilian Amazonia. **Global Change Biology**, 4, 315-333, 1998.

POTTER, C. S.; RANDERSON, J. T.; FIELD, C. B.; MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; KLOOSTER, S. A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 4, p. 811-841, 1993.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**: edição atualizada e ampliada. 2ª ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

PPM – PESQUISA PECUÁRIA MUNICIPAL. Efetivo dos rebanhos. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2015>. Acesso em: 20 de dezembro 2016.

PRINCE, S.D. 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *Int. J. Remote Sens.*, 12: 1313-1330.

PRINCE, S.D.; GOWARD, S.T. Global primary production: a remote sensing approach. *Biogeography*, v.22, p.815-835, 1995.

QIN, Y.; YI, S.; REN, S.; LI, N.; CHEN, J. Responses of typical grasslands in a semi-arid basin on the Qinghai-Tibetan plateau to climate change and disturbances. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, n. 3, p. 1421-1431, 2013.

RASTETTER, E. B.; RYAN, M. G.; SHAVER, G. R.; MELILLO, J. M.; NADELHOFFER, K. J.; HOBBIE, J. E.; ABER, J. D. A general biogeochemical model describing the Responses of the C and N cycles in terrestrial ecosystems to changes in CO₂, climate, and N deposition. *Tree Physiology*, v. 9, p. 101-126, 1991.

REEVES, C. M.; WINSLOW, C. J.; RUNNING, S. W.; **MAPEAMENTO SEMANAL DA VEGETAÇÃO DE PASTAGEM USANDO MODIS**. I Conferência Virtual Global sobre Produção Orgânica de Bovinos de Corte. Via Internet, 2002.

ROSA, R.; [SANO, E.](#) Determinação da produtividade primária líquida (NPP) de pastagens da bacia do Rio Paranaíba, usando imagens MODIS. **Geofocus (Madrid)**, v. 13, p. 367-395, 2013.

RUNNING, S. W.; COUGHLAN, J. C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I: Hydrologic balance, canopy gas Exchange and primary production process. **Ecological Modelling**, v. 42, p. 125-154, 1988.

RUSSELL, G., JARVIS, P.G. and Monteith, J.L., 1989. **Absorption of radiation by canopies and stand growth**. In: G. Russell, B. Marshall and P.G. Jarvis (Editors), *Plant canopies: their growth, form and function*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 21-40.

RUNNING SW, THORNTON PE, NEMANI RR, GLASSY JM. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. Pages 44–57 in Sala O, Jackson R, Mooney H, eds. **Methods in Ecosystem Science**. New York: Springer-Verlag.

SANO, E. E.; ROSA, R. ; BRITO, J. L. ; FERREIRA, L. G. . Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Impressa), v. 43, p. 153-156, 2008.

SANTOS, P. S. **Otimização do pré-processamento e investigação de processos de classificação automática como alternativa para a identificação de pastagens**. Tese (doutorado em Ciências Ambientais), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014. 148 p.

SANTOS, P. S. **Caracterização e mapeamento biofísico ambiental da bacia hidrográfica do rio Vermelho a partir de dados remotamente sensoriados**. - 2014. 157 fls. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais, 2014.

SCARAMUZZA, C. A. M. ; SANO, E. ; ADAMI, M. ; BOLFE, E. ; COUTINHO, A.C.; SILVA, E. B. ; VALERIANO, D. ; ESQUERDO, J. C. D. M. ; MAURANO, L. E. . LAND-USE AND LAND-COVER MAPPING OF THE BRAZILIAN CERRADO BASED MAINLY ON LANDSAT-8 SATELLITE IMAGES. RBC. **REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE)**, v. 69, p. 1041-1051, 2017.

SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - SAE/PR; **Radiografia das Pastagens do Brasil**. Org; FERREIRA Jr, L. G, 2014.

SELLERS, P. J.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; FIELD, C.; HALL, F. G. CANOPY reflectance, photosynthesis and transpiration. III. Reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. **Remote Sensing Environment**, v. 42, n. 3, p. 187-216, 1992.

SELLERS, P. J.; DICKINSON, R. E.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; DENNING, A. S.; MOONEY, H. A.; NOBRE, C. A.; SATO, N.; FIELD, C. B.; HENDERSON-SELLERS, A.. Modeling the exchanges of energy,

water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, v. 275, n. 24, p. 502- 509, 1997.

SEPLAN - Secretaria do Planejamento e Desenvolvimento do Estado de Goiás. Perfil competitivo das regiões de planejamento do estado de Goiás. Goiânia: SEPLAN/SEPIN, 2011, p.109.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Emissões de GEE no Brasil: e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o acordo de paris. Disponível em; <http://seeg.eco.br/analise-de-emissoes-de-gee-no-brasil-1970-2015/>. Acesso em 24 de fev de 2018.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, p.201-211, 2005.

SILVA, B. B. da; GALVÍNCIO, J. D; MONTENEGRO, S. M. G; MACHADO, C. C. C; OLIVEIRA, L. M. M; MOURA, M. S. B. Determinação por Sensoriamento Remoto da Produtividade Primária Bruta do Perímetro Irrigado São Gonçalo – PB. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.28, n.1, p 57-67, 2013.

SILVA, F. B. **Modelagem da Produtividade Primária Bruta na Amazônia**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2013.

SILVA, E. B.; FERREIRA Jr, L. G.; ANJOS dos, A. F.; FAUSTO, M. Análise da Distribuição Espaço Temporal das Pastagens Cultivados no Bioma Cerrado entre 1970 a 2006. **Revista IDeAs**, v. 7, n. 1, p 174-209, 2013.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. A. determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens LANDSAT 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, n.2, p.201-211, 2005.

SBRISSIA, A. F. **Morfogênese, dinâmica do perfilhamento e do acúmulo de forragem em pastos de capim Marandu sob lotação contínua**. 2004. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência Animal e Pastagens) Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2004.

TUCKER, C. J.; DREGNE, H. E.; NEWCOMB, W. W. Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. **Science**, v. 253, p. 299-300, 1991.

USGS - U. S. Geological Survey. 2014. Disponível em: <<http://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

VALLE, C B DO; BARRIOS, S.C.L. ; ALVES, G. F. ; JANK, L. ; Simeão, R. M. **Inovações Tecnológicas no melhoramento de plantas forrageiras**. In: Golberto de Lima Macedo Junior; Manoel Eduardo Rozalino Santos; Leandro Martins Barbero; Janine França; Isabel Cristina Ferreira. (Org.). Inovações tecnológicas - II Simpósio Brasileiro de Produção de Ruminantes no Cerrado. 1ed.Uberlândia: UFU-FAMEV, 2013, v. 1, p. 153-181.

VELOSO, G. A. ; FERREIRA, M. E. ; SILVA, B. B. **Análise da Biomassa Epígea Obtida por Sensoriamento Remoto: um estudo de caso no Projeto de Irrigação Jaíba Minas Gerais.** In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa - PB, Brasil., 2015. p. 2677-2684.

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E. ; ROSA, R. ; SILVA, B. B. DETERMINAÇÃO DO ALBEDO DE SUPERFÍCIE EM ÁREAS IRRIGADAS DO PROJETO JAÍBA (MINAS GERAIS), A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT. **R. RAeGA- O Espaço Geográfico em Análise**, CURITIBA, v. 35, p. 126-146, 2015.

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E.; DA SILVA, B. B. DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DIÁRIA EM ÁREAS IRRIGADAS DO PROJETO JAÍBA (MINAS GERAIS, BRASIL), MEDIANTE IMAGENS LANDSAT 5 - TM. **REVISTA CERRADOS (UNIMONTES)**, v. 15, p. 53-76, 2017.

VIEIRA, P. A.; FERREIRA, M. E. ; FERREIRA, L. G. MODELAGEM DINÂMICA DA PAISAGEM APLICADA NA ANÁLISE DE USO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERMELHO, GOIÁS, BRASIL. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 1, p. 6, 2015.

VIEIRA, P. A. **Dinâmica de ocupação, vulnerabilidades e cenários para bacia hidrográfica do Rio Vermelho, Goiás.** – 2013. 94 fls. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Instituto de Ciências Biológicas, 2013.

WANG, S.; ZHANGA, B.; YANG, Q.; CHENC, G.; YANGA, B.; LUA, L.; SHENA, M.; PENG, Y. Responses of net primary productivity to phenological dynamics in the Tibetan Plateau, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 235-246, 2017.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Delaware, v. 2, p. 184-194, 1981.

WOODWELL, G. M.; MACKENZIE, F. T.; HOUGHTON, R. A.; APPS, M.; GORHAM, E.; DAVIDSON, E. Biotic feedbacks in the warming of the earth. **Climatic Change**, v. 40, p. 495-518, 1998.

YANG P, BYRNE J M and YANG M .2016.Spatial variability of soil magnetic susceptibility, organic carbon and total nitrogen from farmland in northern China; *Catena* 145 92–98.

APÊNDICE I

Etapas metodológicas do algoritmo SEBAL/CASA

Conversão para radiância e reflectância no topo da atmosfera

De posse das imagens do sistema sensor Landsat 8OLI/TIRS, iniciou-se o procedimento metodológico no qual, na primeira etapa, realiza-se a calibração radiométrica, que é a conversão dos números digitais (ND) ou níveis de cinza dos pixels da imagem, em radiância espectral monocromática para as bandas 2,3,4,5,6 e 7. Para esse procedimento, utilizou-se os coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados da imagem. A radiância no topo da atmosfera para as bandas 2 a 7 foi calculada a partir da equação 1 (SILVA, 2015 e RUHOFF *et al*, 2015).

$$L_{\lambda i} = \text{Add}_{\text{rad}} + \text{Mult}_{\text{rad}} \cdot \text{ND} \quad (01)$$

onde L_{λ} corresponde a radiância espectral no topo da atmosfera, Mult_{rad} corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento para cada banda (disponível nos metadados da imagem), Add_{rad} corresponde ao fator aditivo de reescalonamento para cada banda (disponível nos metadados da imagem) e ND corresponde ao número digital para cada pixel.

Em seguida calcula-se a refletância monocromática ($\rho_{\lambda i}$) no topo da atmosfera para cada uma das bandas do visível e infravermelho, dada pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente, obtida pela equação 10 (RUHOFF *et al.*, 2015):

$$P_{\lambda i} = M_p \cdot \text{ND} + A_p \quad (02)$$

onde $P_{\lambda i}$ corresponde a reflectância no topo da atmosfera; M_p corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento para cada banda, A_p corresponde ao fator aditivo de reescalonamento para cada banda (ambos disponíveis nos metadados das imagens). Para a correção da reflectância em função do ângulo de elevação solar e da distância terra-sol, utiliza-se a seguinte equação;

$$D_i = \frac{P_{\lambda i}}{\cos(\theta_{sz}) \frac{1}{d^2}} = \frac{P_{\lambda i}}{\sin(\theta_{se}) \frac{1}{d^2}} \quad (03)$$

onde D_i corresponde a reflectância planetária no topo da atmosfera corrigida, θ_{se} o ângulo de elevação do solar e θ_{sz} representa o ângulo zenital de elevação solar (ambos disponíveis nos metadados das imagens)

3.3 - Albedo Planetário

O albedo planetário (α_{toa}) representa o albedo de cada pixel sem correção atmosférica, obtido a partir das bandas multiespectrais do Landsat 8 OLI/TIRS (bandas 2 a 7), foi calculado pela seguinte equação;:

$$\alpha_{TOA} = \sum(\omega_{\lambda} \rho_{\lambda}) \quad (04)$$

onde ω_{λ} corresponde ao coeficiente de peso de cada banda, calculado de acordo com a Equação 05, sendo proporcional a intensidade da irradiância solar na superfície (Starks *et al.*, 1991).

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum_1^n ESUN_{\lambda}} \quad (05)$$

3.4 - Albedo da Superfície

Em seguida, passou-se para o cálculo do albedo de superfície ou albedo corrigido das imagens. Segundo Maireles (2007), a atmosfera de nosso planeta interfere na radiação solar incidente e na radiação refletida, fazendo-se necessário corrigir o albedo no topo da atmosfera, devido aos efeitos de espalhamento e absorção. Essa correção é feita pela equação 06,

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (06)$$

onde α_{toa} é o albedo planetário; α_p é a reflectância da própria atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas que para o modelo SEBAL tem sido recomendado o valor de 0,03, com base em Bastiaanssen (2000); e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, obtida conforme proposto por Allen *et al.* (2007):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_t \cos z} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos z} \right)^{0,4} \right] \quad (07)$$

em que Z é o ângulo zenital solar obtido; P é a pressão atmosférica média em kPa ; k_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera, sendo $k_t = 1$ para céu claro e $k_t = 0,5$ para turbidez extrema (ALLEN, 1996); e W é a água precipitável em mm , calculada de acordo com a equação 08.

$$W = 0,14e_a P_{air} + 2.1 \quad (08)$$

A pressão atmosférica foi obtida conforme (ASCE-EWRI, 2005):

$$P = 101,3 \left(\frac{T_a - 0,0065.q}{T_a} \right)^{5,26} \quad (09)$$

onde P é a pressão atmosférica; T_a é a temperatura do ar, em Kelvin; e q é a altitude, representada pela imagem SRTM.

3.5 - Índices de Vegetação (NDVI, SAVI e IAF)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) foi obtido através da razão entre a diferença das refletividades do IV-próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V), pela soma das mesmas:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (10)$$

onde ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, às bandas 5 e 4 do Landsat 8 OLI/TIRS.

O Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) que visa amenizar os efeitos do “background” do solo foi calculado segundo a expressão proposta por Huete (1988):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (11)$$

onde o fator L é uma constante de ajuste ao solo, cujo valor usado no estudo foi 0,1 (ALLEN et al., 2007; SILVA et al., 2011; GUSMÃO, et al. 2012).

O Índice de Área Foliar (IAF) é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, e o mesmo foi computado pela seguinte equação empírica, obtida por Allen *et al.* (2002):

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (12)$$

3.6 - Emissividades

Os pixels não emitem radiação eletromagnética como um corpo negro, razão pela qual, ao se calcular a temperatura da superfície, necessita-se calcular sua emissividade (ϵ_{NB}) no domínio espectral da banda termal do TIRS – Landsat 8 (10,4 - 12,5 μm). Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga ϵ_0 (5 - 100 μm). O cálculo de ambas as emissividades é realizado em função do IAF pelas seguintes equações:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF \quad (13)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (14)$$

Considera-se que para $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ e para corpos de água ($IAF < 0$) $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$, conforme recomendações de Silva (2011).

3.7 - Temperatura da Superfície

Após determinar as emissividades, foi obtida a carta de temperatura de superfície (T_s). Para a obtenção da temperatura de superfície, são utilizadas a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda,6}$ e a emissividade ϵ_{NB} , obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela seguinte expressão:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (15)$$

onde $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ K}$ são constantes de calibração da banda termal do Landsat 8 OLI/TIRS.

3.8 - Radiação de onda longa emitida

A radiação de onda longa emitida pela superfície $R_q (\text{Wm}^{-2})$ foi obtida através da equação de Stefan-Boltzman:

$$R_q = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (16)$$

onde ε_0 é a emissividade de cada pixel; σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$); e T_s é a temperatura da superfície (K).

3.9 - Radiação de onda curta incidente

A radiação de onda curta incidente R_s (Wm^{-2}) para dias de céu claro pode ser obtida pela seguinte expressão (ALLEN *et al.*, 2002):

$$R_s = Q \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (17)$$

onde Q é a constante solar (1367 Wm^{-2}); Z é ângulo zenital solar; d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol; e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica.

3.10 - Radiação de onda longa incidente

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície R_e (Wm^{-2}) foi computada pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_e = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (18)$$

onde ε_a é a emissividade atmosférica obtida por: $\varepsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}$ (ALLEN *et al.*, 2002); σ é a constante de Stefan-Boltzmann; e T_a é a temperatura do ar (K).

3.11 - Saldo de radiação

Depois de realizadas todas as etapas, foi computado o saldo de radiação à superfície R_n (Wm^{-2}), utilizando-se a equação do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = R_s (1 - \alpha_{sup}) - R_e + R_q - (1 - \varepsilon_0)R_q \quad (19)$$

onde R_s é a radiação de onda curta incidente; α_{sup} é o albedo corrigido de cada pixel; R_q é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel; R_e é a radiação de onda longa emitida por cada pixel; e ε_0 é a emissividade de cada pixel.

3.12 - Fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo G (Wm^{-2}) é calculado segundo equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 \text{NDVI}^4) \right] \text{Rn} \quad (20)$$

onde T_s é a temperatura da superfície (°C); α é o albedo da superfície; NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada; e Rn é o saldo de radiação.

3.13 - Fluxo de calor sensível (H)

O fluxo de calor sensível H (Wm^{-2}) é a etapa do SEBAL mais susceptível a erros, visto que envolve uma série de pressupostos e considerações, sendo necessário cuidado ao fazê-lo para evitar equívocos. A estimativa do H é feita com base na velocidade do vento e temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície entre dois níveis da superfície, segundo Bastiaanssen *et al.* (1998) e Silva (2011):

$$H = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (21)$$

onde ρ é a massa específica do ar; c_p é o calor específico do ar ($1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$); a e b são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis Z_1 e Z_2 ; T_s é a temperatura da superfície (°C); e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (sm^{-1}). Na estimativa do H no SEBAL, há a necessidade da escolha de dois pixels na cena, denominados “pixels âncoras”, para determinar a variação de temperatura (a e b) em dois níveis diferentes, bem como a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) em todos os pixels da imagem.

Iniciando o cálculo do H, primeiramente são adquiridos os dados da estação meteorológica no local de estudo, que são: a velocidade do vento (ms^{-1}) ao nível de z m e a altura média da vegetação (h) em metros circundante no local da medição da velocidade do vento. A primeira etapa consiste na obtenção coeficiente de rugosidade z_{0m} da estação meteorológica que é calculada em função da altura média da vegetação, segundo equação de Brutsaert (1982):

$$z_{0m} = 0,12h \quad (22)$$

Para esta pesquisa considerou-se a altura média da vegetação da estação meteorológica em 30 cm. Na sequência calculou-se a velocidade de fricção u^* ($m.s^{-1}$) pelo perfil logaritmo do vento para condições de estabilidade neutra:

$$u_* = \frac{K u_x}{\ln\left(\frac{Z_x}{Z_{0m}}\right)} \quad (23)$$

em que K é a constante de Von Karmam ($P= 0,41$); U_x é a velocidade do vento ($m.s^{-1}$) na altura Z_x , que nesta pesquisa utilizou o nível de coleta da estação meteorológica a 10 metros; e Z_{0m} é o coeficiente de rugosidade.

Ainda, considerando-se a atmosfera em estabilidade neutra, é estimada a velocidade do vento para o nível em que a rugosidade da superfície já não afeta a velocidade do vento. Na literatura, esse nível é alcançado a $z = 200$ m, portanto, para a projeção do vento a 200 metros, utilizou-se a seguinte equação (Silva, 2011):

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right)}{k} \quad (24)$$

Considerando a hipótese que u_{200} é constante em toda a área de estudo, será obtida a velocidade de fricção para cada pixel u^* ($m.s^{-1}$) e para cada pixel da imagem, através da equação:

$$u_* = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right)} \quad (25)$$

sendo Z_{0m} obtido em cada pixel da imagem utilizando o SAVI, pela equação proposta por Bastiaanssen (2000):

$$z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62SAVI) \quad (26)$$

Calculado o u^* pixel a pixel na imagem, em seguida estima-se a resistência aerodinâmica r_{ah} ($s m^{-1}$), admitindo-se a atmosfera em condições de estabilidade neutra pela seguinte equação (Silva, 2011):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k} \quad (27)$$

onde z_1 e z_2 são as alturas em metros acima da superfície (em alguns estudos mais recentes têm sido utilizados $z_1 = 0,1$ m e $z_2 = 2,0$ m); u_* velocidade de fricção (ms^{-1}), e k é a constante de von Karman (0,41).

Dando sequência ao procedimento metodológico, a próxima etapa é o computo da diferença de temperatura próximo a superfície dT ($^{\circ}\text{C}$) para cada pixel, sendo computado através da relação linear em dT e T_s , como demonstra a equação (SILVA, 2011):

$$dT = a + bT_{\text{sup}} \quad (28)$$

onde a e b são os coeficientes da relação linear, obtidos através dos pixels quente e frio (pixels âncoras)

Na escolha do pixel frio, admite-se que o mesmo encontra-se em uma área onde se assume que o fluxo de calor sensível é nulo ($H_{\text{frio}}=0$) e o fluxo de calor latente LE_{frio} é máximo, sendo que nesta pesquisa os pixels frios foram obtidos no leito rio São Francisco na área de estudo, calculados pela equação (SILVA, 2011):

$$LE_{\text{frio}} = R_n - G \quad (29)$$

Com isso, a diferença de temperatura do pixel frio é nula.

O pixel quente é escolhido numa área com grande exposição de solo, onde se assume que o fluxo de calor latente é nulo ($LE_{\text{quente}} = 0$) e, portanto, o fluxo de calor sensível H_{quente} (Wm^{-2}) é dado por:

$$H_{\text{quente}} = R_n - G = \frac{\rho c_p (a + bT_{\text{sup}})}{r_{\text{ah}}} \quad (30)$$

onde T_{sup} , R_n , G e r_{ah} são obtidos exatamente no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obtém-se, no pixel quente: $a + bT_{\text{sup}} = r_{\text{ah}}(R_n - G) / \rho c_p$

No entanto, o valor obtido em H , a princípio em cada pixel da imagem, não representa adequadamente e serve como valores iniciais no processo iterativo que busca em cada interação serem reajustados, considerando efetivamente a condição de estabilidade de cada pixel (SILVA, 2011; GOMES, 2009).

Dessa maneira, em decorrência dos efeitos turbulentos afetarem as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov L (m) para identificar as condições de estabilidade da atmosfera, sendo estimado em

função dos fluxos de calor e de momentum, na qual é considerada o cômputo do fluxo de calor sensível em todos os pixels da imagem.

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_s u p}{kgH} \quad (31)$$

onde ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}); c_p é o calor específico do ar a pressão constante; u_* é a velocidade da fricção de cada pixel das imagens (ms^{-1}); T_s é a temperatura da superfície (K); g é o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 \text{ms}^{-2}$); e H é o fluxo de calor sensível (Wm^{-2}), obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade. Os valores de L definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra (SILVA, 2011).

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h) deverão ser considerados. Para isso, utilizam-se as formulações de Silva (2011); Bastiaanssen (1995); Allen (2000); e Bezerra *et al* (2008):

Se $L < 0$ (condição de instabilidade):

$$\psi_{m(100m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(200m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + x_{(200m)}^2}{2} \right) - 2 \arctg(x_{(200m)}) + 0,5 \pi$$

$$\psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2} \right)$$

$$\psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2} \right)$$

onde

$$x_{(200m)} = \left(1 - 16 \frac{200}{L} \right)^{0,25}$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L} \right)^{0,25}$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L}\right)^{0,25}$$

Se $L > 0$ (condição de estabilidade):

$$\Psi_{m(200m)} = -5 \left(\frac{200}{L}\right)$$

$$\Psi_{m(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L}\right)$$

$$\Psi_{m(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L}\right)$$

Se $L = 0$ (condição de neutralidade): $\Psi_m = 0$ e $\Psi_h = 0$.

O valor corrigido para a velocidade de fricção u_* (ms^{-1}) é dado por:

$$u_* = \frac{u_{200} \cdot k}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right) - \Psi_{m(200m)}} \quad (42)$$

onde u_{200} é a velocidade do vento a 200 m (ms^{-1}); k é a constante de von Karman (0,41); z_{0m} é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m); e $\Psi_{m(200m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 200 m.

Com os valores de u_* corrigido, foi obtido o valor corrigido para a resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (sm^{-1}) através da seguinte equação:

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_1} - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* \cdot k}$$

onde $z_2 = 2,0$ m, $z_1 = 0,1$ m, e $\Psi_{h(z_2)}$ e $\Psi_{h(z_1)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente.

Obtidos os valores desses parâmetros, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente até que se obtenha estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura (dT) e da resistência aerodinâmica (r_{ah}) pixel a pixel da imagem (SILVA, 2011).

3.14 - Fluxo de calor latente (LE)

No momento da passagem do satélite, o fluxo de calor latente LE (Wm^{-2}) foi calculado pela equação:

$$LE = Rn - G - H \quad (43)$$

Onde LE é o fluxo de calor latente; Rn é o saldo de radiação; G é o fluxo de calor no solo; e H é o fluxo de calor sensível.

3.15 - Evapotranspiração diária

Os valores da evapotranspiração real diária – ETc (mm dia^{-1}) foram obtidos a partir de extrapolação do valor instantâneo do LE (Equação 43). Com a estimativa do fluxo de calor latente foi possível determinar a evapotranspiração horária, aplicando a seguinte equação:

$$ET_h = 3600 \frac{LE}{n} \quad (44)$$

onde n representa o calor latente de vaporização da água, que pode ser definido como a energia necessária (em joules) para a evaporar uma massa unitária de água (HARRISON, 1963).

$$n = [2,501 - 0,00236(T_s - 273,16)]10^6 \quad (45)$$

em que T_s representa a temperatura de superfície (K) em cada pixel.

Seguindo o procedimento metodológico sugerido por Bastiaansen *et al.* (2005), a evapotranspiração horária foi extrapolada para valores diários, considerando constantes os valores da fração evaporativa, e integrados os valores diários do saldo de radiação, conforme a equação:

$$ET_{24h} = 86400 \frac{\Delta Rn_{24}}{n} \quad (46)$$

em que ET_{24} corresponde a evapotranspiração real diária em mm.d^{-1} ; Δ é a fração evaporativa no instante da passagem do satélite; Rn_{24} representa a radiação de onda curta incidente; e n é o calor latente de vaporização da água.

Para os valores da fração evaporativa calculados em cada pixel da imagem utilizou-se a seguinte equação:

$$FE = \frac{LE}{Rn - G} \quad (47)$$

Para obter o saldo de radiação 24 horas (Rn_{24}) foi aplicada a seguinte equação:

$$R_{n24} = (1 - \text{albedo}) R_{s\downarrow 24} - 123 \tau \quad (48)$$

albedo de superfície, $R_{s\downarrow 24}$ é a média de 24 horas da radiação de onda curta, e τ a transmitância da atmosfera.

APÊNDICE II

