

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA
POR SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTADO
DE MATO GROSSO**

Maísa Caldas Souza Velasque

Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes
Orientador

Cuiabá-MT
Maio de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA POR
SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTADO
DE MATO GROSSO**

Maísa Caldas Souza Velasque

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Física Ambiental.

Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes
Orientador

Cuiabá-MT
Mai de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C145e Caldas Souza Velasque, Maísa.
ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA POR
SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTADO DE MATO
GROSSO / Maísa Caldas Souza Velasque. -- 2016
xvi, 66 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental, Cuiabá, 2016.
Inclui bibliografia.

1. fluxo de carbono. 2. índice de vegetação. 3. floresta tropical
úmida. 4. MODIS. 5. Landsat 5. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

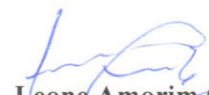
**TÍTULO: ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA POR
SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTADO DE MATO
GROSSO**

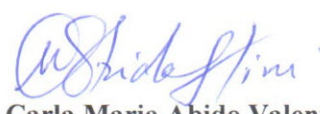
AUTORA: MAÍSA CALDAS SOUZA VELASQUE

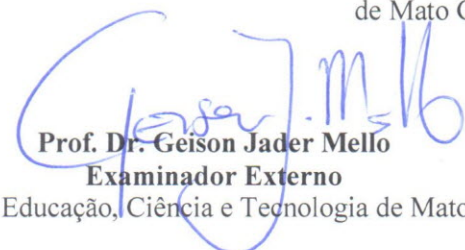
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 18 de maio de 2016, pela comissão julgadora:


Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes
Orientador
Instituto de Física - UFMT


Profa. Dra. Nadja Gomes Machado
Examinadora Interna
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Mato Grosso – IFMT


Prof. Dr. Leone Amorim Curado -
Examinador Interno
Instituto de Física - UFMT


Profa. Dra. Carla Maria Abido Valentini
Examinadora Externa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Mato Grosso – IFMT


Prof. Dr. Geison Jader Mello
Examinador Externo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus por ter me dado o dom da vida além de saúde e disposição para estudar. Ao meu marido Allan, minha filha Teodora e meus pais, José Carlos e Tânia, que sempre me incentivaram a continuar meus estudos me apoiando durante todos estes anos.

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Dr. Marcelo Sacardi Biudes e a professora Dra. Nadja Gomes Machado pela orientação, incentivo, paciência e amizade durante todos estes anos de graduação, mestrado e doutorado;
- Ao professor Paraná e todos os professores que compõem o Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental por tornar o PPGFA um grupo de pesquisa forte e conceituado;
- Ao grupo de estudo GPANESCA que todas as terças-feiras me ajudaram com questionamentos, sugestões e críticas sobre minha pesquisa;
- Ao meu amigo Dr. Victor Hugo de Moraes Danelichen pela amizade, caronas e paciência para tirar minhas dúvidas;
- A CAPES pelo apoio financeiro;
- A todo o grupo de pesquisa em Física Ambiental.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1.INTRODUÇÃO	1
1.1.Problemática	1
1.2.Justificativa	2
1.3. Hipótese	3
1.4.Objetivo Geral	3
1.5.Objetivo Específico	4
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.Floresta de Transição Amazônia Cerrado	5
2.2.Pastagem no Cerrado	7
2.3.Dinâmica do Carbono	8
2.3.1. Fotossíntese e respiração do ecossistema	9
2.4.Estimativa da produção primária bruta por sensoriamento remoto.	10
2.4.1.Modelo de Fotossíntese da vegetação (VPM)	11
2.4.2.Modelo de Temperatura e verdor (TG)	13
2.4.3.Modelo de Índices de vegetação (VI)	14
2.4.4.Produto MOD17A2	15
3.MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1.Descrição das áreas de estudo	16
3.2.Instrumentação	18
3.2.1.Medidas de variáveis climáticas	18
3.2.2.Cálculo de GPP pelo método de Covariância Turbulenta	18
3.2.3.Dados orbitais	19

3.3.Métodos de estimativa de produtividade primária bruta.....	21
3.4.Análise Estatística	22
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1. Variação anual e interanual dos dados micrometeorológicos, GPP _{EC} e dos dados orbitais na Floresta de transição Amazonia-Cerrado (SIN).....	24
4.2. Variação anual e interanual dos dados micrometeorológicos, GPP _{EC} e dos dados orbitais na pastagem no Cerrado (FMI)	31
4.3. Análise dos modelos testados em na floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN)	38
4.4. Análise dos modelos testados na pastagem do Cerrado	42
4.5. Comparação entre os modelos testados.....	45
5. CONCLUSÃO	47
6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	48
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Mapa dos diferentes biomas do Brasil.....	6
FIGURA 2: Localização de Mato Grosso, Brasil, e a torre de fluxo instalada na floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN) e na pastagem no Cerrado (FMI).....	17
FIGURA 3: Torre micrometeorológica instalada na floresta de transição Amazonia-Cerrado (SIN) (a) e pastagem no Cerrado (b).....	17
FIGURA 4: Fluxograma dos modelos testados para a estimativa da produção primária bruta na floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN) e na pastagem no Cerrado (FMI).....	22
FIGURA 5: Média da precipitação total - Ppt (a), radiação fotossinteticamente ativa – PAR (b), temperatura do ar - T_{ar} (c), umidade relativa - UR (d) e produção primária bruta mensal medida pelo método de covariância de vórtices turbulentos - GPP_{EC} (e) para SIN.....	25
FIGURA 6: Média mensal dos índices de vegetação Enhanced Vegetation Index - EVI (a), Normalized Difference Vegetation Index - NDVI (b), Land Surface Water Index - LSWI (c) e do Land Surface Temperature - LST (d) para SIN.....	28
FIGURA 7: Média da precipitação total - Ppt (a), radiação fotossinteticamente ativa – PAR (b), temperatura do ar - T_{ar} (c), umidade relativa - UR (d) e produção primária bruta mensal medida pelo método de covariância de vórtices turbulentos - GPP_{EC} (e) para FMI.....	32
FIGURA 8: Média mensal dos índices de vegetação Enhanced Vegetation Index - EVI (a), Normalized Difference Vegetation Index - NDVI (b), Land Surface Water Index - LSWI (c) e do Land Surface Temperature - LST (d) para FMI.....	35
FIGURA 9: Média mensal da produção primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}) e (a) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (GPP_{VPM}), (b) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM variável (GPP_{VPMvar}), (c) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM com imagens Landsat 5 (GPP_{LAND}), (d) produção primária bruta estimada pelo modelo TG (GPP_{TG}), (e) produção primária bruta estimada pelo modelos VI (GPP_{VI}) e (f) produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS}) em SIN.....	40

FIGURA 10: Média mensal da produção primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}) e (a) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (GPP_{VPM}), (b) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM variável (GPP_{VPMvar}), (c) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM com imagens Landsat 5 (GPP_{LAND}), (d) produção primária bruta estimada pelo modelo TG (GPP_{TG}), (e) produção primária bruta estimada pelo modelos VI (GPP_{VI}) e (f) produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS}) em FMI.....

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Descrição do equipamento utilizado para medir a radiação solar (R_g), saldo de radiação (R_n), temperatura do ar (T_{ar}) e umidade relativa (UR) com as respectivas alturas que cada sensor foi instalado em SIN e em FMI.....	18
TABELA 2: Total anual e sazonal da precipitação (Ppt, mm) e média ($\pm 95\%$ interval de confiança): temperatura do ar (T_{ar} , °C), radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa do ar (UR, %), deficit de pressão de vapor (VPD, kPa), eficiencia do uso da luz (ϵ_g , $\text{gC } \mu\text{mol PAR}^{-1}$), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Water Index (LSWI), Land Surface Temperature (LST, °C), produção primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (GPP_{VPM} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo TG (GPP_{TG} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo VI (GPP_{VI} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) com os índices NDVIxNDVI e produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para SIN.....	27
TABELA 3: Matriz de correlação de Pearson de precipitação, temperatura do ar (T_{ar}), radiação fotossinteticamente ativa (PAR), fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa (UR), déficit de Pressão de vapor (DPV), eficiência de utilização de luz (ϵ_g), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Water Index (LSWI), Land Surface Temperature (LST), produção primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}), produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (GPP_{VPM}), a produção primária bruta prevista pelo modelo TG (GPP_{TG}), a produção primária bruta prevista pelo modelo VI (GPP_{VI}) com os índices NDVIxNDVI e a produção primária bruta pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS}) para SIN.....	30
TABELA 4: Total anual e sazonal da precipitação (Ppt, mm) e média ($\pm 95\%$ interval de confiança): temperatura do ar (T_{ar} °C), radiação	

fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fração da radiação
 fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa do ar (UR, %), deficit de
 pressão de vapor (VPD, kPa), eficiencia do uso da luz (ϵ_g , $\text{gC } \mu\text{mol PAR}^{-1}$),
 Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Vegetation Index
 (NDVI), Land Surface Water Index (LSWI), Land Surface Temperature
 (LST, $^{\circ}\text{C}$), produção primária bruta medida método de covariância turbulenta
 (GPP_{EC} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo TG
 (GPP_{TG} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo VI
 (GPP_{VI} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) com os índices EVI $\times$ NDVI e produção primária bruta
 estimada pelo produto MOD17A2 ($\text{GPP}_{\text{MODIS}}$, $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para FMI..... **33**

TABELA 5: Matriz de correlação de Pearson de precipitação, temperatura
 do ar (T_{ar}), radiação fotossinteticamente ativa (PAR), fração da radiação
 fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa (UR), déficit de Pressão
 de vapor (DPV), eficiência de utilização de luz (ϵ_g), Enhanced Vegetation
 Index (EVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land
 Surface Water Index (LSWI), Land Surface Temperature (LST), produção
 primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}), a
 produção primária bruta previsto pelo modelo de VPM (GPP_{VPM}), a
 produção primária bruta previsto pelo modelo TG (GPP_{TG}), a produção
 primária bruta prevista pelo modelo VI (GPP_{VI}) com os índices EVI $\times$ NDVI,
 e a produção primária bruta prevista pelo produto MOD17A2 ($\text{GPP}_{\text{MODIS}}$)
 para FMI..... **36**

TABELA 6: Coeficiente de Willmott (“d”), erro média absoluto (EMA - $\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), erro quadrado médio (EMQ - $\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e coeficiente de
 determinação (R^2) para os modelos testados em SIN **39**

TABELA 7: coeficiente de Willmott (“d”), erro média absoluto (EMA - $\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), erro quadrado médio (EMQ - $\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e coeficiente de
 determinação (R^2) para os modelos testados em FMI **44**

LISTA DE SIMBOLOS

GPP	Gross Primary Production (Produção primária bruta)
GPP_{EC}	Produção primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta
GPP_{VPM}	Produção primária bruta estimada pelo modelo VPM
GPP_{VPMvar}	Produção primária bruta estimada pelo modelo VPM com a eficiencia do uso da luz variável
GPP_{TG}	Produção primária bruta estimada pelo modelo TG
GPP_{VI}	Produção primária bruta estimada pelo modelo VI
GPP_{MODIS}	Produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2
GPP_{LAND}	Produção primária bruta estimada pelo satélite Landsat 5
$F_{GPP,sat}$	Estimativa de GPP saturado
VPM	Vegetation Photosynthesis Model – Modelo de fotossíntese da vegetação
TG	Temperature and Greenness – Temperatura e verdor
VI	Vegetation Index – Índice de vegetação
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - Imagem espectralradiometro de resolução moderada
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission - Missão de medida de chuva nos tropicos
SIN	Área de estudo em Sinop (Fazenda Continental)
FMI	Área de estudo em Santo Antônio de Leverger (Fazenda Miranda)
LUE	Light Use Efficiency – Eficiencia do uso da luz
PAR	Photosynthetically active radiation - Radiação fotossinteticamente ativa
FPAR	Fração da radiação fotossinteticamente ativa
Rg	Radiação solar
Rn	Saldo de radiação
EVI	Enhanced vegetation index - Índice de vegetação melhorada
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index – Índice de vegetação de diferença normalizada
LSWI	Land Surface Water Index – Índice de água na superfície da terra

$LSWI_{max}$	Land Surface Water Index máximo - Índice de água na superfície da terra máximo
LST	Land Surface Temperature – Temperatura da superfície terrestre
ρ_{prox}	Reflectancia do infravermelho próximo
ρ_{vrm}	Reflectancia do vermelho
ρ_{curto}	Reflectancia do infravermelho curto
ρ_{azul}	Reflectancia do azul
ϵ_0	Eficiência máxima do uso da luz
ϵ_g	Eficiência do uso da luz
P_{est}	Reguladores escalares para efeito da fenologia foliar para fotossíntese das plantas
W_{est}	Reguladores escalares para efeito da água na fotossíntese das plantas
T_{est}	Reguladores escalares para efeito da temperatura na fotossíntese das plantas
T_{ar}	Temperatura do ar
T_{min}	Temperatura mínima para a fotossíntese
T_{max}	Temperatura máxima para a fotossíntese
T_{opt}	Temperatura ótima para a fotossíntese
UR	Umidade relativa do ar
DPV	Déficit de pressão de vapor
IAF	Índice de área foliar
Ppt	Precipitação
NEE	Net ecosystem exchange - Fluxo líquido do ecossistema
NPP	Net primary production – Produtividade primária líquida
Re	Respiração do ecossistema
r	Índice de correlação de Pearson
d	Coeficiente de Willmott
R^2	Coeficiente de determinação
EQM	Erro quadrado médio
EMA	Erro médio absoluto

RESUMO

VELASQUE, M. C. S. **ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA POR SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTADO DE MATO GROSSO**. Cuiabá, 2016, 66f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A produtividade primária bruta (do inglês *Gross Primary Production* - GPP) é definida como as taxas de absorção de carbono por meio da fotossíntese e fornece informações importantes sobre a dinâmica sazonal do ciclo do carbono. As medidas da GPP geralmente são feitas em estações micrometeorológicas usando a técnica de correlação de vórtices turbulentos, porém esta técnica demanda alto custo de instalação e manutenção dos equipamentos. Diante disso, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar diferentes métodos de estimativa de produção primária bruta em uma Floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN) e uma pastagem no Cerrado (FMI) matogrossense por sensoriamento remoto. Quatro modelos de estimativa de GPP foram testados a partir de dados derivados do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Sensor (MODIS) e do TM Landsat 5: o modelo de fotossíntese da vegetação (Vegetation Photosynthesis Model - VPM); o modelo de temperatura e verdor (Temperature e Greenness - TG); o modelo de índice de vegetação (Vegetation Index - VI) e do produto MOD17A2. Os modelos foram comparados com o GPP medido pelo método de correlação turbulenta (Eddy Covariance - EC) nos dois sítios experimentais. Os resultados demonstram que o modelo VPM estimado com dados MODIS apresenta o melhor desempenho para SIN quando foi levado em consideração a variabilidade da eficiência do uso da luz. O segundo melhor desempenho em SIN foi do modelo VPM com dados do TM Landsat 5, seguido pelo produto MOD17A2. Todos os modelos testados apresentaram resultados satisfatórios na FMI, com destaque para o modelo VPM com melhor desempenho. A validação e comparação de modelos obtida nesse trabalho será útil para desenvolver futuros modelos de estimativa do GPP, mas novas avaliações são necessárias em diferentes coberturas vegetais.

Palavras chave: fluxo de carbono, índice de vegetação, floresta tropical úmida, MODIS, TM Landsat 5.

ABSTRACT

VELASQUE, M. C. S. **GROSS PRIMARY PRODUCTION ESTIMATES FOR SENSING REMOTE ON STATE OF MATO GROSSO**. Cuiabá, 2016. 66f. (PhD in Environmental Physics) – Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

Gross primary productivity (GPP) is defined as the overall rates of carbon sink through photosynthesis and it provides important information on the seasonal dynamics of the carbon cycle, allowing the location of the monitoring and study of climate change. The measures of GPP are generally made in micrometeorological stations using the eddy covariance technique, but this technique demands high cost of installation and maintenance of equipment. Thus, the objective of this study was to evaluate different orbital methods for estimate GPP in an Amazon-Cerrado transitional forest (SIN) and a pasture in the Cerrado (FMI) in the state of Mato Grosso by remote sensing. Through data derived from the Moderate Sensor Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and TM Landsat 5 satellite, four orbital models to estimate GPP were tested: the vegetation photosynthesis model (VPM); temperature and greenness model (TG); vegetation index model (VI) and MOD17A2 product. The models were compared with the GPP measured by eddy covariance (EC) in two experimental sites. The most reliable model to estimate GPP was VPM model estimated with MODIS data in SIN when we taken into consideration the variability of efficiency of use of light. The second best performance in SIN was the VPM model with data TM Landsat 5, followed by MOD17A2 product. All the tested models showed satisfactory results in the FMI. The validation and comparison models will be useful in developing future models estimate GPP, still needed to evaluate these models in different vegetation cover.

Keywords: Carbon flux, vegetation index, rainforest, MODIS, TM Landsat 5.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Problemática

As florestas tropicais vêm recebendo atenção especial nos últimos anos devido sua grande diversidade de fauna e flora. Ela possui em média 50% de todas as espécies de plantas encontradas no planeta e representa 40% da produtividade primária líquida (Net Primary Production - NPP) (SAATCHI et al., 2011). Dentre estas, destaca-se a Amazônica que é coberta principalmente por Florestas tropicais densas e algumas áreas de Cerrado.

O Brasil possui a maior extensão da Floresta Amazônica presente no mundo. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) 5831 Km² do território da Amazônia Legal foi desmatado apenas no ano de 2015 sendo que destes 1508 Km² são apenas no estado de MT. A bacia Amazônica é um componente importante no ciclo global do carbono e dos ciclos hidrológicos, portanto o seu desmatamento pode representar impactos a níveis mundiais (NEPSTAD et al., 2008; VOURLITIS et al., 2011).

O Cerrado, também conhecido como Savana, cobre aproximadamente 24% de todo território brasileiro e é o segundo maior tipo de vegetação depois da Floresta Amazônica (VOURLITIS e DA ROCHA, 2010). A região também vem sofrendo com a ação antrópica desde a década de 60, com a concessão de incentivos fiscais para projetos agropecuários na região Centro-Oeste.

Grandes áreas de florestas remanescentes são severamente degradadas pela exploração da madeira, fogo, agricultura e agropecuária. O avanço da atividade

antropogênica tem ocasionado uma modificação da vegetação local, alterando o microclima local e sua biodiversidade. Isto representa mudanças nas propriedades dos fluxos atmosféricos, entre estes o fluxo de carbono, pois pode levar a uma perda líquida de carbono da biomassa e diminuir o estoque de carbono no solo (FEARNSIDE, 2001).

Estudos indicam que a Floresta de transição Amazônia-Cerrado apresente um balanço de carbono nulo, pois absorvem durante a estação úmida e liberam durante a estação seca (VOURLITIS et al., 2002; 2004), contudo devido estas mudanças climáticas, este equilíbrio pode ser alterado (DAMALGRO et al., 2011). A produção primária bruta (Gross Primary Production - GPP) é um componente importante para o estudo local da vegetação, pois traz informações quanto ao balanço de carbono entre a atmosfera e a biosfera, descrevendo a taxa de carbono convertido em biomassa pela fotossíntese (XIAO et al., 2004b).

Ao se monitorar GPP em florestas tropicais e em pastagens podemos compreender fatores de influência na sazonalidade do GPP e até mesmo promover a sustentabilidade destes ecossistemas.

1.2. Justificativa

O estudo sobre o balanço de carbono no ecossistema fornece informações importantes sobre o ambiente, tendo a fotossíntese como o regulador do fluxo de carbono entre a biosfera e a atmosfera (STAGAKIS et al., 2007). Um desafio para o mundo científico tem sido o monitoramento e a previsão deste fluxo nos ecossistemas (STAGAKIS et al., 2007).

As medidas da produção primária bruta (Gross Primary Production – GPP) geralmente são feitas em estações micrometeorológicas usando a técnica de covariância turbulenta (VOURLITIS et al., 2011; BIUDES et al., 2014). Esta técnica mede e calcula o fluxo de carbono dentro das camadas limites da atmosfera. No entanto em alguns casos esta técnica acaba sendo inviável devido alto custo de aquisição, manutenção de equipamentos, além de apresentar erros de medição de CO₂ em condições de baixa turbulência do ar, uma característica bem típica das noites em florestas tropicais (SOUZA et al., 2014).

Diante da necessidade de melhorar as estimativas de GPP, as técnicas de sensoriamento remoto são uma alternativa porque permitem o monitoramento do GPP em escala regional e não apenas local como a técnica de covariância turbulenta,

proporcionando até mesmo a compreensão dos efeitos do uso da terra (DANELICHEN et al., 2015).

Nas últimas décadas o sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta muito útil e prática no estudo de ciclos biogeoquímicos, como carbono, água e troca de energia entre os ecossistemas. A utilização destes dados orbitais são uma ótima alternativa para áreas remotas e espacialmente extensas e complexas. Os índices de vegetação derivados de diferentes bandas de reflectância orbitais oferecem medidas importantes quanto as variações temporais e espaciais de IAF (índice de área foliar), fenologia das plantas e até mesmo quanto a arquitetura do dossel.

Dados de campo integrados ao sensoriamento remoto ou apenas dados orbitais tornam possível a criação de modelos representativos para pontos ou locais em que não é possível se obter dados com maior representatividade além de baixo custo (XIAO et al., 2004b; WU et al., 2010), dependendo apenas da disponibilidade de dados que temos para cada local. Portanto existe a necessidade de análise quanto: a disponibilidade de dados orbitais para cada local, diferentes modelos orbitais para a estimativa de GPP e quais destes modelos apresentam o melhor desempenho para uma Floresta de transição Amazônia Cerrado e uma pastagem no Cerrado Mato-Grossense. Estas análises também são importantes para futuras aplicações destes modelos para melhor quantificação de carbono.

1.3. Hipótese

Os modelos que estimam a produção primária bruta (Gross Primary Production - GPP) exclusivamente por meio de dados de sensoriamento remoto apresentam melhores simulações de GPP, pois, mesmo não utilizando dados meteorológicos de entrada, estes modelos derivados de índices de vegetação apresentam grande sensibilidade quanto as mudanças na vegetação, sazonalidade e quanto a fotossíntese regional.

1.4. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar diferentes métodos de estimativa de produção primária bruta em uma Floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN) e uma pastagem no Cerrado (FMI) matogrossense por sensoriamento remoto.

1.5. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- (1) Analisar as séries da produção primária bruta (Gross Primary Production – GPP) medidas pelo método de covariância turbulenta (Eddy Covariance - EC) nos dois sítios experimentais;
- (2) Analisar as séries dos índices de vegetação: EVI (Enhanced vegetation index - Índice de vegetação melhorada), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Índice de vegetação de diferença normalizada), LSWI (Land Surface Water Index – Índice de água na superfície da terra) e LST (Land Surface Temperature – Temperatura da superfície) nos dois sítios experimentais;
- (3) Avaliar o desempenho do modelo VPM (Vegetation Photosynthesis Model - Modelo de fotossíntese da vegetação) ao estimar o GPP nos dois sítios experimentais utilizando produtos MODIS e dados micrometeorológicos;
- (4) Avaliar o desempenho do modelo VPM (Vegetation Photosynthesis Model - Modelo de fotossíntese da vegetação) ao estimar o GPP na floresta de transição Amazônia-Cerrado SIN utilizando imagens do TM Landsat 5 e dados meteorológicos;
- (5) Avaliar o desempenho do produto GPP MOD17A2 para os dois sítios experimentais;
- (6) Analisar o desempenho dos modelos TG (Temperature and Greenness – Temperatura e verdor) e VI (Vegetation Index – Índice de vegetação) ao estimar o GPP nos dois sítios experimentais utilizando apenas produtos MODIS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Floresta de Transição Amazônia Cerrado

O Brasil apresenta uma grande variedade de biomas (FIGURA 1). Em extensão, o maior de todos é a Floresta Tropical, ocupando 42% do território brasileiro, seguido pelo Cerrado, considerado uma área de grande importância ecológica, tanto pela sua diversidade, quanto pela alta taxa de desmatamento dos últimos anos (TANNUS, 2004; FERREIRA et al., 2015).

A Amazônia representa mais da metade das florestas tropicais remanescentes do planeta, sendo que 85% da floresta Amazônica está em território brasileiro (FIGURA 1). Esta é considerada rica por sua diversidade de fauna e flora, além de apresentar um papel importante na regulação do clima, do regime hidrológico e do estoque de carbono terrestre.

O Cerrado por sua vez é considerado uma savana tropical. Apresenta grande biodiversidade e possui papel importante na manutenção das condições climáticas quando interfere no processo de ciclagem da água. É formado principalmente por gramíneas, pequenas palmeiras e pequenas árvores de aparência retorcida. No período chuvoso existe grande produção de biomassa e na estação seca este acúmulo de biomassa seca acaba favorecendo os incêndios que são recorrentes na região (KLINK e SOLBRIG, 1996).



FIGURA 1: Mapa dos diferentes biomas do Brasil. Fonte: <http://profvladimir.blogspot.com.br/2012/02/fotos-mapas-de-biomas-e-vegetacao.html>.

Em todo o planeta, os biomas não apresentam separação nítida entre si. Esta zona de transição entre diferentes biomas é denominada por ecótono. Ecótono é uma região de transição no qual coexistem as duas vegetações, sob as mesmas condições climáticas, dentro de um intenso regime de competição e formando um gradiente entre os biomas presentes (ACKERLY, 1989; TANNUS, 2004).

A zona de transição entre a Floresta Amazônia e o Cerrado ocorre ao longo de toda a extensão de distribuição destes dois biomas e está situada em uma região conhecida como “arco do desmatamento”. Temos que 42% desta área de transição abrange o território mato-grossense e merece atenção, pois é considerada uma região mais sensível a mudanças climáticas, além de ser alvo de grande expansão da agricultura e pecuária (VOURLITIS et al., 2005; MALHI e WRIGHT, 2006; DALMAGRO et al., 2011).

Esta zona de transição se move ao longo do tempo em função de condições ambientais. Algumas pesquisas apontam que se mantidas elevadas as taxas de desmatamento, pode haver um processo de “savanização” da Amazônia, ou seja, um

deslocamento da fronteira para o interior da Floresta (TANNUS, 2004). Este sucesso de um bioma em detrimento do outro se dá por condições microclimáticas, variações do relevo ou propriedade do solo.

Algumas pesquisas indicam que florestas são como um consumidor de CO₂ (GRACE et al., 1995; MALHI et al., 1998), entretanto com as mudanças climáticas ocorridas nos últimos anos, como seca prolongada e chuvas em excesso, este ciclo pode estar sendo alterado (VOURLITIS et al., 2002, 2004; DALMAGRO et al., 2011). Pesquisas mais recentes apontaram que a Floresta de Transição Amazônia Cerrado tem apresentado um equilíbrio nulo no fluxo líquido de CO₂, pois age como sumidouro no período chuvoso e como fonte no período de seca (DALMAGRO et al., 2011).

Portanto existe a real necessidade de monitoramento contínuo e de longo prazo para compreender estas possíveis alterações para a Floresta de Transição Amazônia Cerrado como para o possível deslocamento da fronteira entre a Amazônia e o Cerrado.

2.2. Pastagem no Cerrado

O Cerrado está localizado na região central do Brasil (FIGURA 1) e é considerado uma Savana Tropical. Formado principalmente por gramíneas, pequenas palmeiras e árvores de aparência retorcida. As árvores da região apresentam caules retorcidos e raízes longas, que permitem a absorção da água mesmo na estação seca, período no qual a profundidade da água pode chegar até 2 m.

De acordo com Ribeiro e Walter (1998) o Cerrado pode ser dividido em cinco variações fisionômicas: Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Cerrado, Cerrado *Stricto Sensu* e Cerradão. No campo limpo encontramos predominantemente herbáceas, com raros arbustos e ausência de árvores. O restante da área é coberta por formas fisionômicas menos representativas.

O Campo sujo é estruturado por herbáceos arbustivos, com arbustos esparsos e subarbustos. Formado também pelos tipos menos desenvolvidos do Cerrado *Stricto Sensu*. A vegetação lenhosa apresenta altura de 2 m e cobertura na faixa de 5%.

O campo Cerrado é um subtipo da vegetação arbórea-arbustiva, com cobertura na faixa de 2 a 20% e altura média de 2 a 3 m.

Cerrado *Stricto Sensu* é caracterizado por árvores baixas e tortas, com ramificações irregulares e retorcidas. Com arbustos esparsos, apresenta um dossel descontínuo com cobertura arbórea de 20 a 50%. A altura média das árvores é de 3 a 6 m.

O Cerradão é uma floresta com aspectos xeromórficos. Conta com a presença de espécies do Cerrado *Stricto Sensu* e das Florestas Tropicais. A copa das árvores é contínua, com cobertura arbórea variando entre 50 a 90% e altura média de 8 a 15 m.

O Cerrado também é visto como uma alternativa ao desmatamento na Amazônia especialmente para abertura de novas áreas de cultivo de grãos. Em Mato Grosso, a expansão agrícola e abertura de novas áreas de pastagens tem substituído extensas áreas nativas de Cerrado por gramíneas e vegetação com raízes superficiais (GIAMBELLUCA et al., 2009). Estas mudanças afetam as propriedades dos fluxos atmosféricos, entre estes o fluxo de carbono, pois pode levar a uma perda líquida de carbono da biomassa e diminuir o estoque de carbono no solo (FEARNSIDE, 2001).

2.3. Dinâmica de carbono

O fluxo de dióxido de carbono pode ser definido em produção primária bruta (Gross Primary Production – GPP) e respiração do ecossistema (Re) (THENKABAIL, 20105). Quando temos que o GPP é maior que Re, a troca líquida do ecossistema (Net Ecosystem Exchange – NEE) é positiva. Ou seja, temos que o ecossistema é um sumidouro de carbono, consumindo mais carbono do que liberando. Quando Re é maior que o GPP, temos que este ecossistema é uma fonte de carbono, portanto NEE apresenta valores negativos. Sendo assim, a produção líquida de um ecossistema é definida como a diferença entre a produção primária bruta e a respiração do ecossistema (CHAPIN et al., 2011) (EQUAÇÃO 1):

$$NEE = GPP - Re \quad (1)$$

Outra forma de se avaliar este mesmo processo é analisando pelo lado da atmosfera. Neste caso, o NEE designa-se produção líquida do ecossistema (Net ecosystem production - NEP) e é o inverso de NEE. Sendo assim, temos que:

$$NEP = - NEE \quad (2)$$

Ou seja, quando temos um NEP positivo, sabemos que a atmosfera esta recebendo carbono e, portanto o ecossistema esta liberando. Na situação contrária, com NEP negativo, a atmosfera esta perdendo carbono e consequentemente o ecossistema esta absorvendo.

2.3.1. Fotossíntese e respiração do ecossistema

A produção primária bruta (Gross primary production – GPP) é definida como o total de carbono presente no processo de fotossíntese. Sendo que a fotossíntese é o processo em que as plantas convertem energia luminosa em energia química (MALHI e WRIGHT, 2006). Entretanto nem toda energia luminosa proveniente do sol que chega a superfície é convertida em energia química pela fotossíntese. Apenas a radiação que tem um comprimento de onda entre 400 nm e 700 nm permite as plantas realizarem fotossíntese. Esta radiação é conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (Photosynthetic Active Radiation – PAR).

A realização da fotossíntese das plantas necessita de PAR, entretanto o aumento de PAR não ocasiona necessariamente o aumento da eficiência da fotossíntese, uma vez que esta energia excedente é dissipada pela fotorrespiração. No momento em que a capacidade de absorção de luz pela clorofila torna-se saturada, a fotossíntese atinge o seu máximo (CHAPIN et al., 2011). Em resposta a esta disponibilidade de luz, as plantas alteram sua condutância estomática, ajustando o fornecimento de CO₂ para atender as necessidades de fixação de carbono da planta (CHAPIN et al., 2011).

A produtividade primária bruta também esta ligada a temperatura, pois para que haja fotossíntese, é necessário calor (CHAPIN et al., 2011). Portanto a temperatura do ar influencia este processo de fotossíntese, pois interfere nas perdas de água da planta por transpiração e em situações de carência hídrica. O processo de fotossíntese é regulado por enzimas, que são eficientes a uma dada temperatura optima, sendo que abaixo ou acima desta temperatura estas enzimas são menos eficientes.

Outro fator importante para a fotossíntese é a quantidade de água disponível seja na atmosfera (umidade relativa) ou no solo, pois se os níveis de água forem baixos, em épocas de seca, a planta fecha parcialmente ou total os estômatos, condicionando a entrada de CO₂ atmosférico e também de PAR, alterando a taxa de fotossíntese. Da mesma forma em situações de baixa umidade, a planta tende a perder mais água pela

transpiração foliar, da forma que os estômatos podem ser total ou parcialmente fechados, tornando-se sensíveis a presença de CO_2 .

Concluindo, os estômatos fecham sempre que a concentração de CO_2 aumenta, quer nos estômatos devido aumento da respiração, quer na atmosfera.

2.4. Estimativa de produção primária bruta por sensoriamento remoto

Tradicionalmente a produção primária bruta (Gross Primary Production – GPP) tem sido estimada a partir de medições da troca líquida do ecossistema (Net Ecosystem Exchange – NEE) considerando as perdas pela respiração, por meio do método de covariância turbulenta (THENKABAIL, 2015). Entretanto nos últimos anos o processo de modelagem esta sendo desenvolvido aliando dados orbitais e dados micrometeorológicos, além de modelos que são desenvolvidos apenas por índices de vegetação.

Segundo Monteith (1972) a produtividade da vegetação esta diretamente relacionada com a radiação que chega a superfície da copa das plantas. Os modelos que se baseiam em eficiência do uso da luz (Light Use Efficiency – LUE) para a estimativa de GPP e NEE são baseados na equação que define a quantidade de carbono fixado através da fotossíntese como proporcional a energia solar absorvida pela vegetação, multiplicado pela eficiência do uso da luz utilizada para a fixação deste carbono (MONTEITH, 1972).

O conceito de LUE tem sido amplamente utilizado no sensoriamento remoto para se avaliar os processos de carbono. Embora esta energia solar absorvida pela vegetação seja fácil de ser estimada pelo “verdor” da vegetação, a eficiência do uso da luz é difícil de ser estimada, sendo disponível apenas para um conjunto específico de biomas (THENKABAIL, 2015). Diante de muitas tentativas de estimar GPP baseado exclusivamente em sensoriamento remoto, observou-se que os índices de vegetação podem ser usados para estimar a taxa de processos que dependem da luz absorvida, como a fotossíntese e a respiração.

Portanto a partir da equação de Monteith (1972) novas abordagens foram propostas. Cada uma tentando enfatizar algum termo, como radiação fotossinteticamente ativa (PAR), a fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) ou a eficiência do uso da

luz (Light Use Efficiency – LUE). Portanto a validação quanto a produtividade primária bruta continua um desafio que deve levar em consideração problemas a níveis espaciais e temporais (TURNER et al., 2004).

2.4.1. Modelo de Fotossíntese da vegetação (VPM)

O modelo de fotossíntese da vegetação (Vegetation Photosynthesis Model - VPM) de Xiao et al. (2004c), é um modelo baseado na eficiência do uso da luz (Light Use Efficiency – LUE) (LIU et al., 2011) que utiliza-se de estimativas de satélites, permitindo o mapeamento diário da produtividade primária bruta (CHAPIN et al., 2011).

Este modelo utiliza-se de índices de vegetação e da eficiência do uso da luz (ε_g) que é descrita por alguns parâmetros reguladores T_{esc} , W_{esc} e P_{esc} que correspondem à temperatura, água e fenologia da eficiência do uso da luz na vegetação, respectivamente, para a estimativa da produção primária bruta (EQUAÇÃO 3):

$$GPP = \varepsilon_g \cdot FPAR_{chl} \cdot PAR \quad (3)$$

$$FPAR_{chl} = \alpha \cdot EVI \quad (4)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \cdot T_{esc} \cdot W_{esc} \cdot P_{esc} \quad (5)$$

, em que PAR é a radiação fotossinteticamente ativa incidente média do dia, descrita em $\text{mol m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e $FPAR_{chl}$ é a fração de PAR absorvida pela planta para a realização da fotossíntese, ou seja, pela clorofila (XIAO et al., 2004a; VETRITA et al., 2011).

É um desafio estimar $FPAR_{chl}$ com precisão, portanto este modelo utiliza-se de uma função linear de EVI (Enhanced Vegetation Index - Índice de vegetação melhorada) para a estimativa de $FPAR_{chl}$, assumindo o coeficiente α ajustado para 1 (XIAO et al., 2003; 2004a). Nesta pesquisa estimamos $FPAR_{chl}$ por meio do EVI estimado pelo sensor MODIS e por imagens TM Landsat 5.

A eficiência do uso da luz ε_g é descrita em g C/mol PAR e deve ser calibrado rigorosamente, pois apresenta grande impacto sobre o modelo, além de ser um fator que varia de acordo com cada vegetação em específico (SIMS et al., 2008). A estimativa da eficiência máxima do uso da luz ε_0 é determinada pela escolha do modelo, seja ele linear ou não linear (como por exemplo, hiperbólico) (XIAO et al., 2004b). Como

sugerido pelo modelo VPM, ε_0 é calculado por meio da função de Michaelis-Menton (WOHLFART et al., 2005):

$$NEE = \frac{\varepsilon_0 PAR F_{GPP,sat}}{\varepsilon_0 PAR + F_{GPP,sat}} - R_e \quad (6)$$

Normalmente para o modelo VPM, utiliza-se um valor fixo para a eficiência do uso da luz, entretanto apenas para a área experiemntal de SIN optou-se por estimar GPP, assim como proposto pelo modelo, fixo, mas também com ε_0 variando mensalmente, considerando a dinâmica diária do GPP medido pelo método de covariância turbulenta. O valor de ε_0 para SIN é de 0,54 g C/mol PAR e para FMI 0,10 g C/mol PAR.

O parâmetro T_{esc} (EQUAÇÃO 7) representa a sensibilidade da temperatura da fotossíntese, calculada diariamente pela equação desenvolvida pelo Modelo de ecossistemas terrestres (Terrestrial Ecosystem Model), proposto por Raich et al. (1991):

$$T_{esc} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{[(T - T_{min})(T - T_{max})] - (T - T_{opt})^2} \quad (7)$$

, em que T corresponde a temperatura do ar e T_{min} , T_{max} e T_{opt} correspondem a temperatura mínima, máxima e ótima para a fotossíntese respectivamente (°C). Para situações em que a temperatura do ar esta abaixo da temperatura mínima, admitiu-se T_{esc} como zero (XIAO et al., 2004b).

Para todas as plantas, a atividade fotossintética é mais eficiente dentro de certo limite de temperatura, sendo que acima ou abaixo deste intervalo as reações químicas necessárias para a fotossíntese são inibidas. Este limite é amplo e varia de vegetação para vegetação. Tanto para a Floresta de Transição como para o Cerrado admitiu-se que T_{min} é 2,0 °C, T_{max} como 40,0 °C e T_{opt} equivale a 35,1 °C, o que se assemelha aos valores encontrados por Xiao et al. (2005) e Vetrita et al. (2011) para florestas tropicais.

O efeito da água para a fotossíntese da planta, W_{esc} (EQUAÇÃO 8), é calculado em função da umidade do solo e/ou déficit de pressão de vapor, que são fatores altamente determinantes do teor de água na planta e do dossel (XIAO et al., 2003).

$$W_{esc} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}} \quad (8)$$

, em que LSWI representa o efeito da água nas plantas para a fotossíntese e $LSWI_{max}$ o valor máximo para LSWI dentro da estação de crescimento da planta, sendo que para o presente estudo, este foi considerado 0,38 para a Floresta SIN e 0,22 para a pastagem FMI.

No modelo VPM, P_{esc} (EQUAÇÃO 9) é o efeito da fenologia foliar na fotossíntese do dossel. A idade da folha afeta a capacidade fotossintética e a troca de carbono da vegetação.

$$P_{esc} = \frac{1 + LSWI}{2} \quad (9)$$

Para estimar o efeito da fenologia foliar, durante a brotação de expansão das folhas, utiliza-se a equação 9. Entretanto, após a expansão completa da folha, assume-se $P_{esc} = 1$. Pelo estudo em SIN ser realizado em uma floresta tropical que apresenta uma cobertura verde o ano todo, admitiu-se $P_{esc} = 1$ ao longo de todos os anos de estudo, pois em florestas semidecíduas, existem folhas crescendo e expandindo o tempo todo, ou seja, apresentam folhas de várias idades, entretanto para a pastagem em FMI P_{esc} foi estimado apenas por meio da equação 9.

2.4.2. Modelo de Temperatura e verdor (TG)

O modelo de temperatura e verdor (Temperature e greenness - TG) foi desenvolvido por Sims et al. (2008) baseado em EVI (Enhanced Vegetation Index - Índice de vegetação melhorada) e em LST (Land Surface Temperature – Temperatura da superfície terrestre), ambos índices derivados dos produtos do sensor MODIS. Uma importante correlação entre LST, DPV (Deficit de Pressão de Vapor) e PAR (Photosynthetic Active Radiation - Radiação fotossinteticamente ativa) tem sido encontrada. Combinando EVI e LST, o modelo melhora a correlação entre o GPP previsto e o GPP medido em torre (WU et al., 2011).

Os resultados descritos por Sims et al. (2008) indicam que a relação entre GPP e LST para regiões úmidas, não apresenta uma estimativa ideal, e para regiões de seca, os

resultados são precisos a cerca de 30°C, com GPP declinando para zero quando LST esta próximo de 0°C ou aumentando, quando a temperatura esta próximo de 50°C. Embora não esteja claro quais os efeitos que a temperatura tem diretamente sobre as taxas fotossintéticas (WU et al., 2010), a relação para LST foi definida como:

$$\text{EscalaLST} = \min \left[\left(\frac{\text{LST}}{30} \right); (2,5 - (0,05 \times \text{LST})) \right] \quad (10)$$

, em que EscalaLST é definida como o mínimo de duas equações lineares. Isto resulta em um valor máximo de EscalaLST = 1,0 para LST = 30°C e valores mínimos quando LST ≤ 0°C ou LST ≥ 50°C (SIMS et al., 2008; WU et al., 2010). Estudos anteriores de Sims et al. (2008) também retratam que GPP cai para zero quando o EVI esta em torno de 0,1. Portanto, a EscalaEVI é definida como:

$$\text{EscalaEVI} = \text{EVI} - 0,1 \quad (11)$$

Portanto o Modelo TG é definido como:

$$\text{GPP} \propto \text{EscalaLST} \times \text{EscalaEVI} \quad (12)$$

2.4.3. Modelo de Índices de vegetação (VI)

O Modelo Índice de Vegetação (Vegetation Index – VI) é um modelo de estimativa de GPP proposto por Wu et al. (2010). Ele incorpora índices de vegetação para estimar LUE (Light Use Efficiency – eficiência do uso da luz) e FPAR (fração da radiação fotossinteticamente ativa). Este modelo foi proposto baseado em diferentes literaturas que demonstram que os índices de vegetação representam tanto LUE como FPAR (GITELSON et al., 2006; INOUE et al., 2008), pois ambos apresentam as mesmas características biofísicas.

O Modelo VI é definido de acordo com a lógica Monteith:

$$\text{GPP} \propto \text{IV} \times \text{IV} \times \text{PAR} \quad (13)$$

, em que os índices de vegetação (IV) são os índices utilizados para a estimativa deste GPP. Foram testados os índices de vegetação: EVI x NDVI.

2.4.4. Produto MOD17A2

O produto Produção Primária Bruta (MOD17A2) do sensor MODIS é designado para fornecer medidas regulares do crescimento da vegetação terrestre baseado na eficiência do uso da luz (Light use efficiency - LUE), utilizando a cobertura diária MODIS terra, FPAR/LAI. O produto é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$GPP = \varepsilon_{max} \cdot m.(T_{min}) \cdot m(DPV) \cdot FPAR \cdot SW_{rad} \cdot 0,45 \quad (14)$$

, onde ε_{max} é a eficiência do uso da luz máxima obtido a partir da tabela de pesquisa com base no tipo de vegetação, $m.(T_{min})$ e $m.(DPV)$ são escalas entre 0 e 1 para reduzir ε_{max} em condições desfavoráveis de baixa temperatura e alto déficit de pressão de vapor, FPAR é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação e SW_{rad} é a radiação de ondas curtas, dos quais 45% (0,45) é fotossinteticamente ativa (RESTREPO-COUBE et al., 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição das áreas de estudo

Este trabalho foi realizado em dois sítios experimentais localizados no estado de Mato Grosso, Brasil (FIGURA 2). Um localizado ao norte do estado, em uma floresta semi-decídua densa de Transição entre a Floresta Amazônica e o Cerrado – Fazenda Continental, a 50 km NE próximo a cidade de Sinop (SIN) (11°24'44.28"S: 55°19'28.77"O). A altura do dossel é 22-25 m e o índice de área foliar (IAF) varia de 2,5 m² m⁻² na estação seca para aproximadamente 6,0 m² m⁻² na estação chuvosa (BIUDES et al., 2014). A vegetação é dominada por espécies *Brosimum lactescens*, *Qualea paraensis* e *Tovomita schomburkii* (VOURLITIS et al., 2014).

A média da temperatura é em torno de 24°C, com pouca variação sazonal. A precipitação anual é de 2000 mm com uma estação seca que vai de maio a setembro (VOURLITIS et al., 2008). O solo é um Quartzarenico Neosolo caracterizada pela textura arenosa (84% de areia, silte 4% e 12% de argila) nos 50 cm superiores do solo (PRIANTE-FILHO et al., 2004). O solo é pobre em nutrientes, têm elevada porosidade e drena rapidamente a água das chuvas (VOURLITIS et al., 2002).

O segundo sítio experimental esta ao sul da bacia amazônica, em uma região de Cerrado, Fazenda Miranda (FMI) (15°43'53,66"S e 56°04'13,50"O) localizado a 15 km de Cuiabá. A região apresenta um misto de floresta e pastagem característica de Cerrado (localmente conhecida como campo sujo). A vegetação é denominada por gramíneas nativas e não nativas e por árvores semi-decíduas das espécies: *Curatella americana* L. e *Diospyros hispida* A. DC (VOURLITIS et al., 2013) (FIGURA 3).

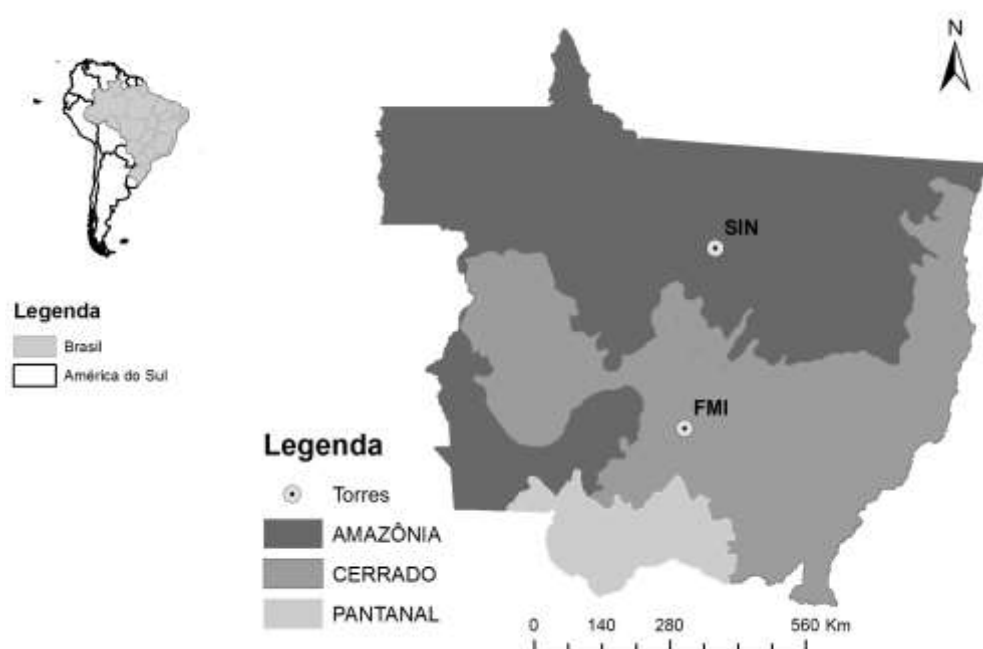


FIGURA 2: Localização de Mato Grosso, Brasil, e a torre de fluxo instalada na floresta de transição Amazônia Cerrado (SIN) e na pastagem no Cerrado (FMI).



FIGURA 3: Torres micrometeorológicas instaladas na floresta de transição Amazonia-Cerrado (SIN) (a) e na pastagem no Cerrado (b).

A temperatura média é de 25,7°C e a precipitação anual é de aproximadamente 1200 mm, com um período de seca que se dá entre os meses de maio a setembro

(BIUDES et al., 2012). O solo é rochoso, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, também conhecido como um Plintossolo (RADAMBRASIL, 1982), com alta taxa de infiltração de água, mas com capacidade de retenção de água limitada (DOMINGUES et al., 2013).

3.2. Instrumentação

3.2.1. Medidas de variáveis climáticas

As medidas micrometeorológicas foram realizadas no período de julho de 2005 a junho de 2008 para a Floresta de transição Amazônia Cerrado (SIN) e de março de 2011 a dezembro de 2012 para a pastagem no Cerrado (FMI). Os dados micrometeorológicos foram coletados continuamente, sendo: radiação solar (R_g), saldo de radiação (R_n), temperatura do ar (T_{ar}) e umidade relativa (UR). Os sensores de aquisição de dados foram praticamente idênticos para ambas áreas de estudo e são apresentados na Tabela 1. Os dados de precipitação em SIN foram obtidos diariamente por um pluviômetro localizado a 5 Km da torre.

TABELA 1: Descrição do equipamento utilizado para medir a radiação solar (R_g), saldo de radiação (R_n), temperatura do ar (T_{ar}) e umidade relativa (UR) com as respectivas alturas que cada sensor foi instalado em SIN e em FMI.

Variável Micrometeorológica	Descrição do equipamento	Altura instalada (m)	
		SIN	FMI
R_g	LI200X, LI-COR, Lincoln, NE, USA	42	5
R_n	NRLITE, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands	42	5
T_{ar}/UR	HMP-45AC, Vaisala Inc., Woburn, MA, USA	39 e 45	5 e 18

3.2.2. Cálculo de GPP pelo método de Covariância Turbulenta

O sistema de covariância turbulenta era formado por um anemometro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) para medir a

média e flutuações da velocidade do vento e temperatura, e um analisador de gás infravermelho de caminho aberto (LI-7500, LI-COR, Inc., Lincoln, NE, EUA) para medir as médias e flutuações de vapor de H₂O. Ambos os sensores incluídos na amostra e dados de saída estavam orientados na direção do vento. Os fluxos médios eram armazenados e processados a cada 30 minutos por um datalogger (CR5000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA em SIN e um CR1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA em FMI). Os fluxos de vapor de água foram corrigidos para as variações simultaneas de calor de acordo com Webb et al. (1980).

3.2.3. Dados orbitais

Os dados de precipitação para FMI foram obtidos a partir do produto 3B43 V6 do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (Missão de medição de chuvas tropicais - TRMM) disponibilizados pelo Distributed Active Archive System (DAAC) (<http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM>). O pixel TRMM tem uma área mínima de aproximadamente 25 Km² (DANIELICHEN et al., 2013).

Baixamos os dados do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - Imagem espectralradiômetro de resolução moderada): de reflectância da superfície terrestre (produto MOD09A1), temperatura da superfície (Land Surface Temperature – LST) e emissividade (produto MOD11A2) e dados de produção primária bruta (produto MOD17A2). Estes dados são disponibilizados a cada 16 dias a partir do Centro de Dados EROS Centro de Arquivo Ativo (http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb_MODIS_fim_subconjunto_col5.pl global) com base na informação de localização geográfica (latitude e longitude) das áreas experimentais SIN e FMI.

Os valores da reflectância da superfície terrestre obtidas pelo produto MOD09A1 foram utilizados para calcular o Enhanced Vegetation Index (Índice de vegetação melhorada – EVI) (HUETE et al., 1997), Normalized Difference Vegetation Index (Índice de vegetação de diferença normalizada) e o Land Surface Water Index (Índice de água na superfície da terra –LSWI) (XIAO et al., 2002, 2004). Estes índices são calculados por meio da reflectância azul (ρ_{azul}), vermelha (ρ_{verm}), o infravermelho próximo (ρ_{prox}) e o infravermelho de ondas curtas (ρ_{curto}), de acordo com as equações a seguir:

$$EVI = 2,5 \cdot \frac{\rho_{prox} - \rho_{verm}}{\rho_{prox} + 6 \cdot \rho_{azul} - 7,5 \cdot \rho_{verm} + 1} \quad (15)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{prox} - \rho_{verm}}{\rho_{prox} + \rho_{verm}} \quad (16)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{prox} - \rho_{curto}}{\rho_{prox} + \rho_{curto}} \quad (17)$$

Os valores de todos os produtos MODIS utilizados foram medidos para os nove pixels que cobrem a torre micrometeorológica. Foram utilizadas as métricas de garantia de qualidade (QA) mais elevadas.

Variações da geometria de visualização do sensor, presença de nuvens, aerossóis e reflectância bidirecional podem limitar a eficácia de dados, portanto técnicas de extração de sinais são utilizadas para melhorar possíveis ruídos (HIRD e MCDERMID, 2009; HERMANCE et al., 2007). Aplicamos a análise espectro singular (SSA) utilizando o software catmv (GOLYANDINA e OSIPOVA, 2007), que tem se mostrado eficaz para a reconstrução de series temporais e para melhorar a relação sinal ruído da reflectância dos produtos de superfície terrestre do MODIS (ZEILHOFER et al., 2011).

Obtivemos também 22 imagens de refletâncias geradas pelo Mapeador Temático – TM do satélite Landsat 5, sendo apenas para o sítio experimental de SIN, órbita 226 e ponto 68, junto ao banco de dados Earth Explorer do U.S. Geological Survey – USGS por meio da página <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Só foi possível obter imagens de reflectância para a área experimental de SIN, pois para o período de dados utilizados nesta pesquisa em FMI, o satélite Landsat 5 já estava desativado.

As refletâncias do Landsat 5 são compostas de sete bandas espectrais com resolução espacial de 30 m x 30 m, sendo que a passagem do Landsat 5 na área de estudo em SIN ocorreu aproximadamente às 09h30min (tempo local) nos dias estudados. As reflectâncias da superfície são geradas a partir de software especializado Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) que foi desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), no qual LEDAPS realiza as correções atmosféricas para cada banda do imageador (<http://daac.ornl.gov/MODELS/guides/LEDAPS.html>).

A equação do EVI contém um fator de ajuste para solos (L) e dois coeficientes (C1 e C2), os quais são determinados empiricamente, assumindo-se 1,0, 6,0 e 7,5 como seus respectivos valores, conforme visto na equação 15. Eles descrevem o uso da banda azul

para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico (JENSEN, 2009). No entanto, as imagens utilizadas neste estudo já possuíam os efeitos da atmosfera corrigidos.

Portanto utilizamos o modelo proposto por Jiang et al. (2008), que apresenta comportamento similar ao tradicional índice EVI, porém com melhor sensibilidade em áreas com alta biomassa. Outra vantagem deste modelo é que não precisamos utilizar a banda do azul (banda 1), que apresenta distorções decorrentes do espalhamento atmosférico (JIANG, 2008).

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{(\rho_{nir} + 2.4 \times \rho_{red} + 1)} \quad (18)$$

3.3. Métodos de estimativa de produtividade primária bruta

Os métodos para a estimativa de padrões globais do balanço de carbono vêm sendo continuamente testados e melhorados (CHAPIN et al., 2011). Técnicas de sensoriamento remoto são utilizadas, pois são mais representativas tanto para a escala regional como global. Relacionando os índices de vegetação a processos ecofisiológicos como: evaporação, transpiração e fotossíntese, é possível melhorar a estimativa da produção primária bruta (Gross Primary Production – GPP), tendo em vista que dependendo das condições locais, podem existir métodos mais adequados e eficazes (SOUZA et al., 2014).

Nesta pesquisa testamos modelos de estimativa de GPP baseados em dados de sensoriamento remoto aliado a dados micrometeorológicos e modelos baseados unicamente em dados de sensoriamento remoto para ambos sítios experimentais SIN e FMI. Segue abaixo esquema de modelos testados:

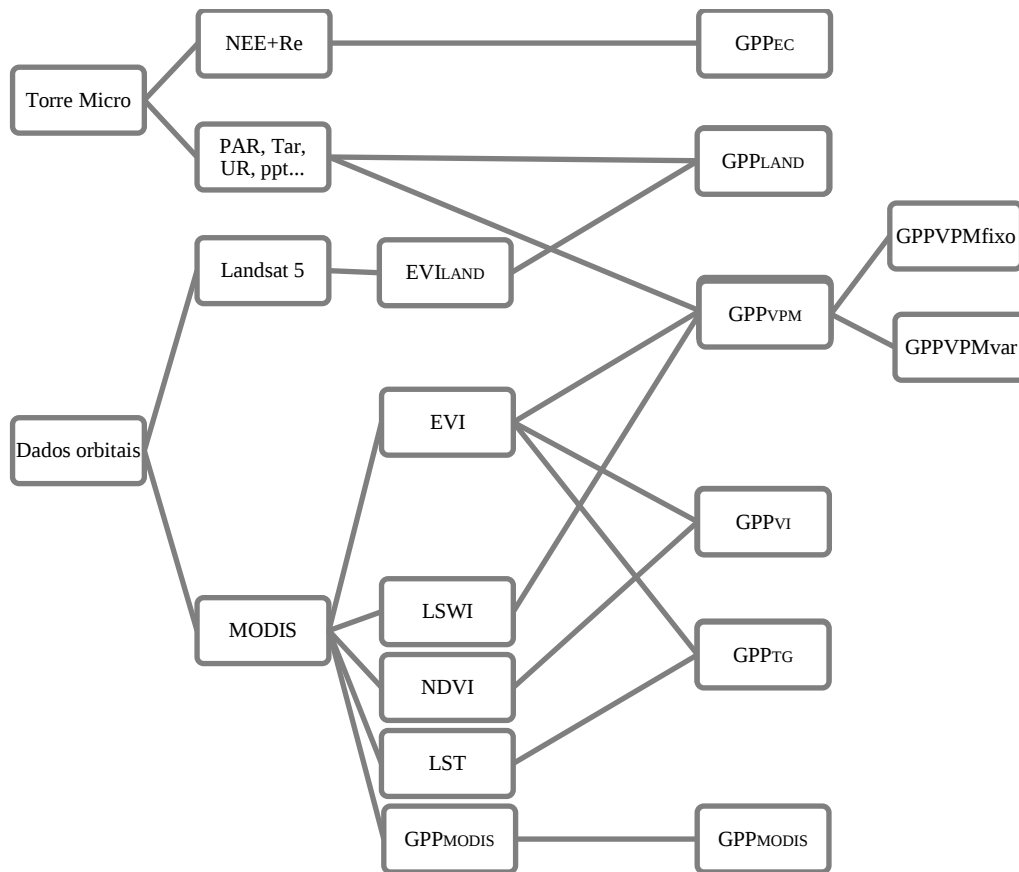


FIGURA 4: Fluxograma dos modelos testados para a estimativa da produção primária bruta na floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN) e na pastagem no Cerrado (FMI).

3.4. Análise estatística

A avaliação do desempenho dos modelos e produtos foi realizada por meio de alguns indicadores como: a correlação de Pearson, exatidão – coeficiente de Willmott “d” (EQUAÇÃO 19); erro médio absoluto “EMA” (EQUAÇÃO 20) e a raiz do erro quadrático médio “EQM” (EQUAÇÃO 21). A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada por um índice designado de concordância que pode ser amplamente aplicado à comparação entre modelos (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam de 0 (zero), com nenhuma concordância, a 1 (um), com concordância perfeita.

$$d = 1 - \left[\sum (P_i - O_i)^2 / \sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2 \right] \quad (19)$$

, em que P_i é o valor estimado, O_i o valor observado e O a média dos valores observados.

O EMA indica o afastamento (desvio) médio absoluto dos valores estimados em relação aos valores medidos, podendo ser obtido por:

$$EMA = \sum \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (20)$$

O EQM indica quanto o modelo falha em estimar a variabilidade das medidas em torno da média e mede a variação dos valores estimados ao redor dos valores medidos (WILLMOTT e MATSUURA, 2005). O menor limite de EQM é 0, o que significa que há plena adesão entre as estimativas do modelo e as medidas. O ideal seria que os valores do EMA e do EQM fossem próximos de zero (WILLMOTT e MATSUURA, 2005). O EQM pode ser obtido por:

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (21)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variação anual e interanual dos dados micrometeorológicos, GPP_{EC} e dos dados orbitais na floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN)

A precipitação interanual na floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN) variou entre 957,00 e 2077,20 mm, com média de 1559,80 mm ao longo de todo o período avaliado. A precipitação durante a estação chuvosa corresponde a 84% do total da precipitação em SIN (FIGURA 5). Os maiores valores mensais de precipitação para SIN ocorreram em dezembro e janeiro de todos os anos, chegando a 558 mm em janeiro de 2007.

A temperatura média do ar não apresentou variação significativa (TABELA 2) entre as estações em SIN, entretanto temos que houve uma diminuição da temperatura em torno de 2°C do ano de 2005 até 2008 (FIGURA 5). A temperatura do ar para SIN variou entre 23,1°C e 27,7°C. A temperatura média do ar para SIN foi de 24,8°C, sendo abaixo dos valores encontrados por Vilani et al. (2006) para os anos de 2001 a 2003, na mesma torre micrometeorológica. A temperatura máxima do ar para SIN foi de 27,7°C em setembro de 2005. O ano de 2005 se destaca na região amazônica, pois foi um ano marcado por uma seca intensa em toda a região (MARENGO et al., 2008).

FIGURA 5: Média da precipitação total (a), Radiação fotossinteticamente ativa (b), temperatura do ar (c), umidade relativa (d) e produção Primária Bruta mensal (e) medida pelo método de Covariância Turbulenta (GPP_{EC}) para SIN.

A radiação fotossinteticamente ativa (Photosynthetically active radiation – PAR) variou entre 225,11 e 555,34 mol m⁻² dia⁻¹ em SIN com média de 406,15 mol m⁻² dia⁻¹. Os valores de PAR foram 10,5% maior na estação seca para a região de floresta SIN, com picos entre junho e julho, devido a maior quantidade de dias de céu claro (SOUZA et al., 2014) (FIGURA 5). Os picos de PAR se deram em julho de 2006 e mínimo em dezembro de 2005 para SIN. A FPAR (fração da radiação fotossinteticamente ativa) não variou ao longo dos anos para SIN.

A umidade relativa (UR) variou entre 59% e 88% em SIN. A UR foi 12% maior na estação chuvosa em SIN, sendo que os maiores valores da UR foram para o ano de 2008 (FIGURA 5).

A eficiência do uso da luz variou de 0,10 para 1,10 gC μmol PAR⁻¹ anualmente em SIN, com média de 0,41 gC μmol PAR⁻¹ (FIGURA 5). A eficiência do uso da luz foi 19% maior na estação chuvosa. A importância da precipitação para a eficiência de utilização da luz tem sido bem documentada e foi observada por Sendall et al. (2009) e Vourlitis et al. (2011) ao estudarem a taxa de fotossíntese líquida e a troca líquida de CO₂ do sistema (Net Ecosystem Exchange - NEE) nesta mesma área de estudo em SIN.

A variação mensal da produção primária bruta (GPP_{EC}) apresentou uma tendência sazonal consistente, se mostrando positivamente afetadas pelas chuvas, apesar de não apresentar correlação significativa (FIGURA 5) (TABELA 3). A GPP_{EC} foi 14% maior no período chuvoso para SIN. A GPP na floresta de Transição em Sinop SIN variou entre 4,66 e 11,03 gC m⁻² (8 dias⁻¹), com média 8,05 gC m⁻² (8 dias⁻¹).

Variáveis como PAR e FPAR, apesar de consideradas importantes para a estimativa da produção primária bruta, não influenciaram GPP_{EC} em SIN (TABELA 3). A única variável altamente correlacionada com GPP em SIN é a eficiência do uso da luz. Esta parece ser uma característica típica da floresta de transição Amazônia-Cerrado.

TABELA 2: Total anual e sazonal da precipitação (Ppt, mm) e média ($\pm 95\%$ intervalo de confiança): temperature do ar (T_{ar} , °C), radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa (%), deficit de pressão de vapor (DPV, kPa), eficiencia do uso da luz (ε_g , $\text{gC } \mu\text{mol PAR}^{-1}$), índice de vegetação melhorada (enhanced vegetation index - EVI), índice de vegetação por diferença normalizada (normalized difference vegetation index - NDVI), índice de água na superfície da terra (land surface water index - LSWI), temperature da superfície terrestre (land surface temperature - LST, °C), produção primária bruta medido pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (com ε_0 fixo GPP_{VPM} e com ε_0 variável GPP_{VPMvar} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo TG (GPP_{TG} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo VI (GPP_{VI} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) com os índices EVI $\times$ NDVI e produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para SIN.

	2005			2006			2007			2008		
	Anual (jul-dez)	Seco	Chuvoso	Anual (jan-dez)	Seco	Chuvoso	Anual (jan-dez)	Seco	Chuvoso	Anual (jan-jun)	Seco	Chuvoso
Ppt	957,0	75,0	882,0	2040,0	104,0	1936,0	2077,2	0,0	2077,2	1165,0	49,0	1116,0
T_{ar}	26,2 $\pm$ 0,3	26,2 $\pm$ 0,2	26,3 $\pm$ 0,3	24,6 $\pm$ 0,2	24,3 $\pm$ 0,2	24,8 $\pm$ 0,2	24,6 $\pm$ 0,2	24,3 $\pm$ 0,3	24,8 $\pm$ 0,2	23,7 $\pm$ 0,2	23,8 $\pm$ 0,2	23,6 $\pm$ 0,2
PAR	435,4 $\pm$ 26,0	461,0 $\pm$ 19,0	409,9 $\pm$ 32,4	430,7 $\pm$ 20,8	489,7 $\pm$ 9,4	388,5 $\pm$ 28,9	406,8 $\pm$ 17,1	464,3 $\pm$ 12,5	365,7 $\pm$ 20,3	310,4 $\pm$ 25,3	352,8 $\pm$ 23,8	282,1 $\pm$ 26,4
FPAR	0,89 $\pm$ 0,00	0,89 $\pm$ 0,00	0,89 $\pm$ 0,00	0,90 $\pm$ 0,00	0,89 $\pm$ 0,00	0,90 $\pm$ 0,00	0,91 $\pm$ 0,00	0,91 $\pm$ 0,00	0,91 $\pm$ 0,00	0,91 $\pm$ 0,00	0,90 $\pm$ 0,01	0,91 $\pm$ 0,00
UR	70,3 $\pm$ 2,3	66,3 $\pm$ 2,2	74,3 $\pm$ 2,4	77,47 $\pm$ 2,8	69,5 $\pm$ 3,0	83,1 $\pm$ 2,6	75,6 $\pm$ 2,0	67,6 $\pm$ 2,4	81,4 $\pm$ 1,7	81,8 $\pm$ 1,3	79,7 $\pm$ 2,7	83,9 $\pm$ 0,0
DPV	0,83 $\pm$ 0,07	0,93 $\pm$ 0,07	0,72 $\pm$ 0,07	0,58 $\pm$ 0,06	0,77 $\pm$ 0,04	0,44 $\pm$ 0,04	0,62 $\pm$ 0,05	0,81 $\pm$ 0,06	0,47 $\pm$ 0,05	0,42 $\pm$ 0,03	0,49 $\pm$ 0,07	0,39 $\pm$ 0,00
ε_g	0,35 $\pm$ 0,03	0,17 $\pm$ 0,01	0,52 $\pm$ 0,05	0,31 $\pm$ 0,03	0,21 $\pm$ 0,02	0,37 $\pm$ 0,03	0,44 $\pm$ 0,03	0,26 $\pm$ 0,02	0,56 $\pm$ 0,04	0,78 $\pm$ 0,03	1,09 $\pm$ 0,00	0,68 $\pm$ 0,04
EVI	0,57 $\pm$ 0,02	0,56 $\pm$ 0,01	0,59 $\pm$ 0,02	0,53 $\pm$ 0,03	0,52 $\pm$ 0,01	0,53 $\pm$ 0,04	0,54 $\pm$ 0,02	0,53 $\pm$ 0,01	0,55 $\pm$ 0,02	0,49 $\pm$ 0,01	0,50 $\pm$ 0,01	0,49 $\pm$ 0,02
NDVI	0,85 $\pm$ 0,02	0,88 $\pm$ 0,01	0,82 $\pm$ 0,03	0,84 $\pm$ 0,03	0,87 $\pm$ 0,00	0,82 $\pm$ 0,04	0,88 $\pm$ 0,01	0,87 $\pm$ 0,01	0,90 $\pm$ 0,01	0,80 $\pm$ 0,03	0,86 $\pm$ 0,00	0,78 $\pm$ 0,04
LSWI	0,34 $\pm$ 0,00	0,35 $\pm$ 0,00	0,33 $\pm$ 0,00	0,33 $\pm$ 0,00	0,35 $\pm$ 0,01	0,32 $\pm$ 0,00	0,34 $\pm$ 0,01	0,35 $\pm$ 0,01	0,33 $\pm$ 0,00	0,32 $\pm$ 0,00	0,33 $\pm$ 0,00	0,32 $\pm$ 0,00
LST	27,95 $\pm$ 0,64	28,10 $\pm$ 0,56	27,80 $\pm$ 0,72	26,94 $\pm$ 0,61	27,75 $\pm$ 0,41	26,37 $\pm$ 0,76	27,31 $\pm$ 0,62	30,26 $\pm$ 0,51	26,60 $\pm$ 0,73	25,41 $\pm$ 0,33	26,45 $\pm$ 0,34	25,15 $\pm$ 0,33
GPP_{EC}	7,2 $\pm$ 0,2	5,6 $\pm$ 0,2	8,7 $\pm$ 0,2	7,3 $\pm$ 0,3	6,4 $\pm$ 0,4	8,0 $\pm$ 0,3	8,5 $\pm$ 0,2	7,3 $\pm$ 0,1	9,4 $\pm$ 0,2	9,7 $\pm$ 0,3	11,0 $\pm$ 0,0	9,3 $\pm$ 0,4
GPP_{VPM}	18,4 $\pm$ 1,1	19,5 $\pm$ 0,8	17,39 $\pm$ 1,3	18,2 $\pm$ 0,8	20,7 $\pm$ 0,4	16,4 $\pm$ 1,2	17,2 $\pm$ 0,7	19,6 $\pm$ 0,5	15,4 $\pm$ 0,8	11,6 $\pm$ 0,8	10,7 $\pm$ 0,0	11,9 $\pm$ 1,1
GPP_{VPMvar}	9,9 $\pm$ 0,5	6,3 $\pm$ 0,4	13,58 $\pm$ 0,6	9,49 $\pm$ 0,8	6,5 $\pm$ 0,4	8,0 $\pm$ 0,3	12,5 $\pm$ 0,6	8,8 $\pm$ 0,3	15,1 $\pm$ 0,9	16,4 $\pm$ 0,8	21,3 $\pm$ 0,0	14,8 $\pm$ 1,1
GPP_{TG}	9,1 $\pm$ 0,3	9,3 $\pm$ 0,3	8,87 $\pm$ 0,3	8,29 $\pm$ 0,3	8,3 $\pm$ 0,2	8,2 $\pm$ 0,3	8,5 $\pm$ 0,3	8,7 $\pm$ 0,2	8,4 $\pm$ 0,4	9,6 $\pm$ 0,0	-	9,6 $\pm$ 0,0
GPP_{VI}	21,0 $\pm$ 0,5	19,9 $\pm$ 0,2	22,17 $\pm$ 0,7	19,50 $\pm$ 0,7	18,2 $\pm$ 0,6	21,1 $\pm$ 0,7	17,7 $\pm$ 0,5	19,4 $\pm$ 0,3	16,5 $\pm$ 0,5	11,2 $\pm$ 0,3	12,8 $\pm$ 0,6	9,5 $\pm$ 0,0
GPP_{MODIS}	3,6 $\pm$ 0,4	3,2 $\pm$ 0,2	4,13 $\pm$ 0,5	5,36 $\pm$ 0,4	4,8 $\pm$ 0,3	5,7 $\pm$ 0,5	5,3 $\pm$ 0,3	4,8 $\pm$ 0,3	5,5 $\pm$ 0,4	6,3 $\pm$ 0,3	6,7 $\pm$ 0,2	6,2 $\pm$ 0,4

O índice de vegetação melhorada (enhance vegetation index – EVI) anual em SIN varia de 0,35 a 0,72, com média de 0,53, porém EVI não apresenta grande sazonalidade em SIN sendo apenas 2% maior no período chuvoso (FIGURA 6). O índice de vegetação de diferença normalizada (normalized difference vegetation index –NDVI) também não apresentou sazonalidade em SIN, sendo praticamente constante de 2006 a 2008 (FIGURA 6). O NDVI foi em média 5% maior na estação chuvosa que no período seco. Com mínimo de 0,61 e máximo de 0,92, com média de 0,86.

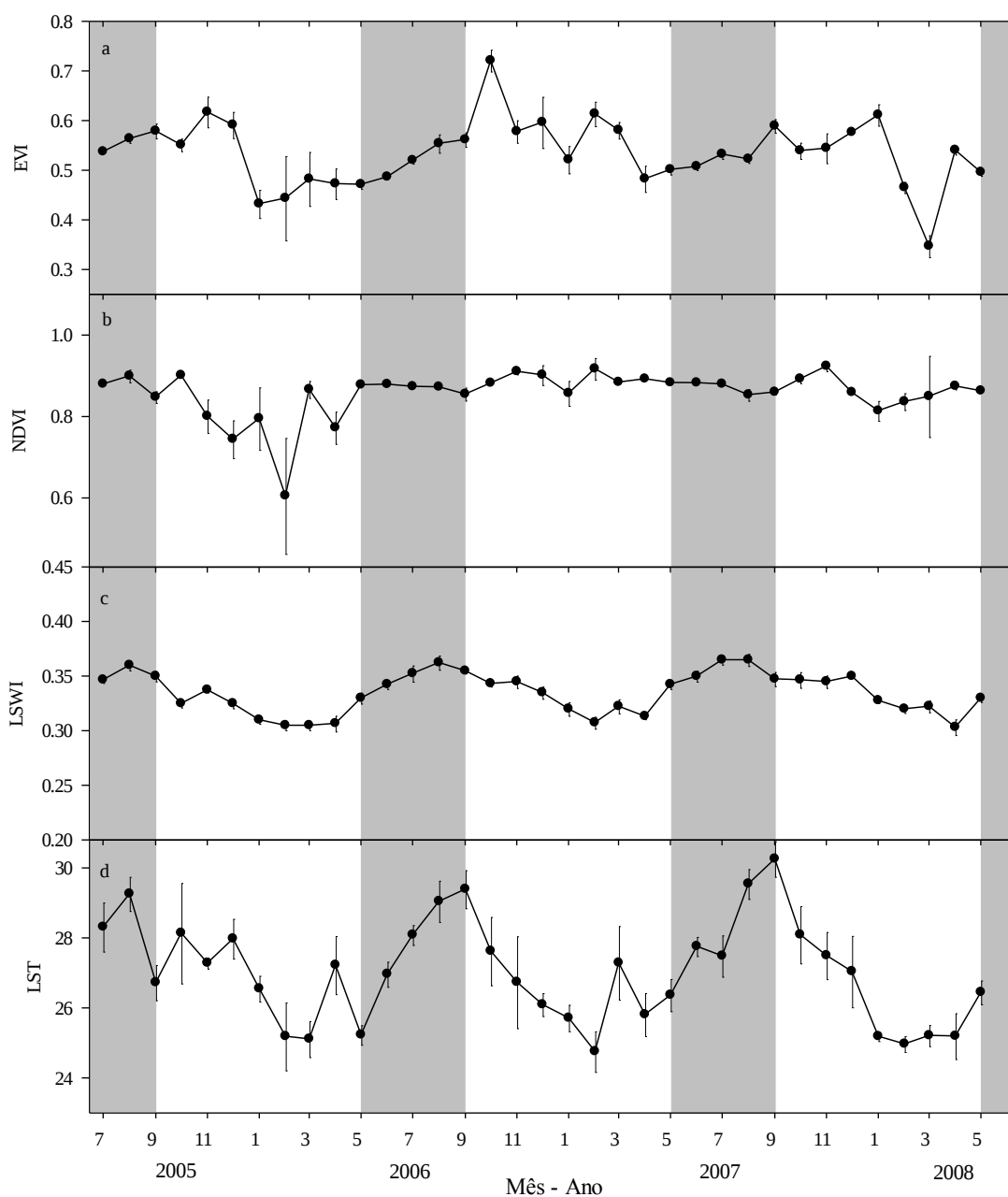


FIGURA 6: Média mensal dos índices de vegetação Enhanced Vegetation Index - EVI (a), Normalized Difference Vegetation Index - NDVI (b), Land Surface Water Index - LSWI (c) e do Land Surface Temperature - LST (d) para SIN.

O índice de água na superfície da terra (land surface water index – LSWI) em SIN apresentou valor máximo de 0,37 e mínimo de 0,30 (FIGURA 6). O LSWI em SIN foi 6% maior na estação seca, o que não corresponde ao esperado. O LSWI tem sido usado para caracterizar condições hídricas da vegetação de estudo, tendo que maiores valores representam maior disponibilidade de água no ecossistema (XIAO et al., 2004c).

Provavelmente devido o dossel fechado na floresta de transição Amazônia-Cerrado, os valores das refletâncias medidas pelos sensores orbitais não são diretamente influenciadas pelo conteúdo de água no solo, e sim, pela água nas folhas. Altos valores de LSWI na estação seca podem ser atribuídos a: (1) alta proporção de folhas jovens (com maior conteúdo de água na folha) por meio da fenologia foliar como indicada pela dinâmica sazonal do EVI, e (2) alta espessura d'água equivalente no dossel superior suprido pelo sistema de raízes profundo. Folhas jovens possuem mais conteúdo de água na folha que folhas velhas (ROBERTS et al., 1998). Sendo assim, a dinâmica sazonal do LSWI indica que não houve stress hídrico ao longo da estação seca nos anos analisados.

O índice temperatura da superfície terrestre (Land Surface Temperature – LST) na floresta SIN apresentou valores maiores no período da seca, sendo 6% maior que na estação chuvosa. O LST máximo encontrado em SIN foi de 30,2°C e mínimo de 24,7°C. Apesar dos valores serem próximos aos medidos para a temperatura do ar em torre, não existe correlação entre eles.

TABELA 3: Matriz de correlação de Pearson de precipitação, temperature do ar (T_{ar} , °C), radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa (%), deficit de pressão de vapor (DPV, kPa), eficiencia do uso da luz (ϵ_g , $\text{gC } \mu\text{mol PAR}^{-1}$), índice de vegetação melhorada (enhanced vegetation index - EVI), índice de vegetação por diferença normalizada (normalized difference vegetation index - NDVI), índice de água na superfície da terra (land surface water index - LSWI), temperature da superfície terrestre (land surface temperature - LST, °C), produção primária bruta medido pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}), a produção primária bruta previsto pelo modelo de VPM (com ϵ_0 fixo GPP_{VPM} e com ϵ_0 variável GPP_{VPMvar} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), a produção primária bruta previsto pelo modelo TG (GPP_{TG}), a produção primária bruta prevista pelo modelo VI (GPP_{VI}) estimado pelo índice EVI $\times$ NDVI, e a produção primária bruta prevista pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS}) para SIN.

	Ppt	T_{ar}	PAR	FPAR	UR	DPV	ϵ_g	EVI _{MODIS}	NDVI	LSWI	LST	GPP_{EC}	GPP_{VPM}	GPP_{VPMvar}	GPP_{TG}	GPP_{VI}	GPP_{MODIS}
Ppt	1	-0.31	-0.48	-0.05	0.81**	-0.76*	0.72*	-0.19	0.07	-0.44	-0.77*	0.60	-0.47	0.62	-0.43	-0.34	0.42
GPP_{EC}	0.60	-0.40	-0.30	0.19	0.53	-0.54	0.80**	0.05	-0.04	-0.39	-0.59	1	-0.30	0.97***	-0.36	-0.42	0.45
GPP_{VPM}	-0.47	-0.12	0.99***	-0.32	-0.32	0.29	-0.75*	0.83**	0.19	0.42	0.27	-0.30	1	-0.35	0.75*	0.86**	-0.23
GPP_{VPMvar}	0.62	-0.33	-0.34	0.11	0.49	-0.48	0.86**	-0.02	-0.09	-0.42	-0.53	0.97***	-0.35	1	-0.46	-0.52	0.34
GPP_{TG}	-0.43	-0.39	0.76*	0.23	-0.20	0.13	-0.76*	0.80*	0.61	0.74*	0.40	-0.36	0.75*	-0.46	1	0.89***	-0.17
GPP_{VI}	-0.34	-0.18	0.86**	-0.11	-0.12	0.11	-0.82***	0.77*	0.47	0.46	0.18	-0.42	0.86**	-0.52	0.89***	1	-0.04
GPP_{MODIS}	0.42	-0.15	-0.23	0.11	0.71*	-0.66*	0.34	-0.09	-0.04	-0.57	-0.66*	0.45	-0.23	0.34	-0.17	-0.04	1

* $p\text{-valor} < 0,05$; ** $p\text{-valor} < 0,01$; *** $p\text{-valor} < 0,001$

4.2. Variação anual e interanual dos dados micrometeorológicos, GPP_{EC} e dos dados orbitais na pastagem no Cerrado (FMI)

A precipitação variou entre 1028,40 e 1610,30 mm na pastagem do Cerrado (FMI), com média de 1319,35 mm (FIGURA 7). A precipitação durante a estação chuvosa corresponde a 83% do total da precipitação em FMI com apenas algumas chuvas esporádicas no período da seca, sendo esta uma característica bem típica da região de Cerrado (VOURLITIS e da ROCHA, 2011).

A temperatura do ar em FMI apresentou pouca variação, sendo entre 26,37°C e 27,05°C, com média de 26,7°C para todo o período de estudo (FIGURA 7). A temperatura média do ar em FMI foi 6% maior no período chuvoso, com mínimos em junho e julho e valores máximos entre setembro e outubro. As flutuações na temperatura média do ar em FMI foram menores na estação chuvosa em comparação com a seca, devido às frentes frias que se originam no sul do Brasil causando quedas que podem chegar até 10°C na temperatura do ar nesta estação (RODRIGUES et al., 2014). Entretanto não existe diferença entre as temperaturas médias do ar para os anos de 2011 e 2012 em FMI (TABELA 4).

Sabe-se que a fotossíntese é um dos processos fisiológicos mais sensíveis ao calor, visto que as altas temperaturas foliares têm sido apontadas por muitos autores, como o principal fator que afeta a fixação de carbono nas diversas etapas do processo (DALMAGRO et al., 2009). Essas altas temperaturas resultam em aumento do DPV (déficit de pressão de vapor), que por sua vez leva a uma diminuição da condutância estomática, que reduz a fotossíntese líquida, fazendo com que a planta necessite retirar mais água de suas raízes (WU et al., 2010).

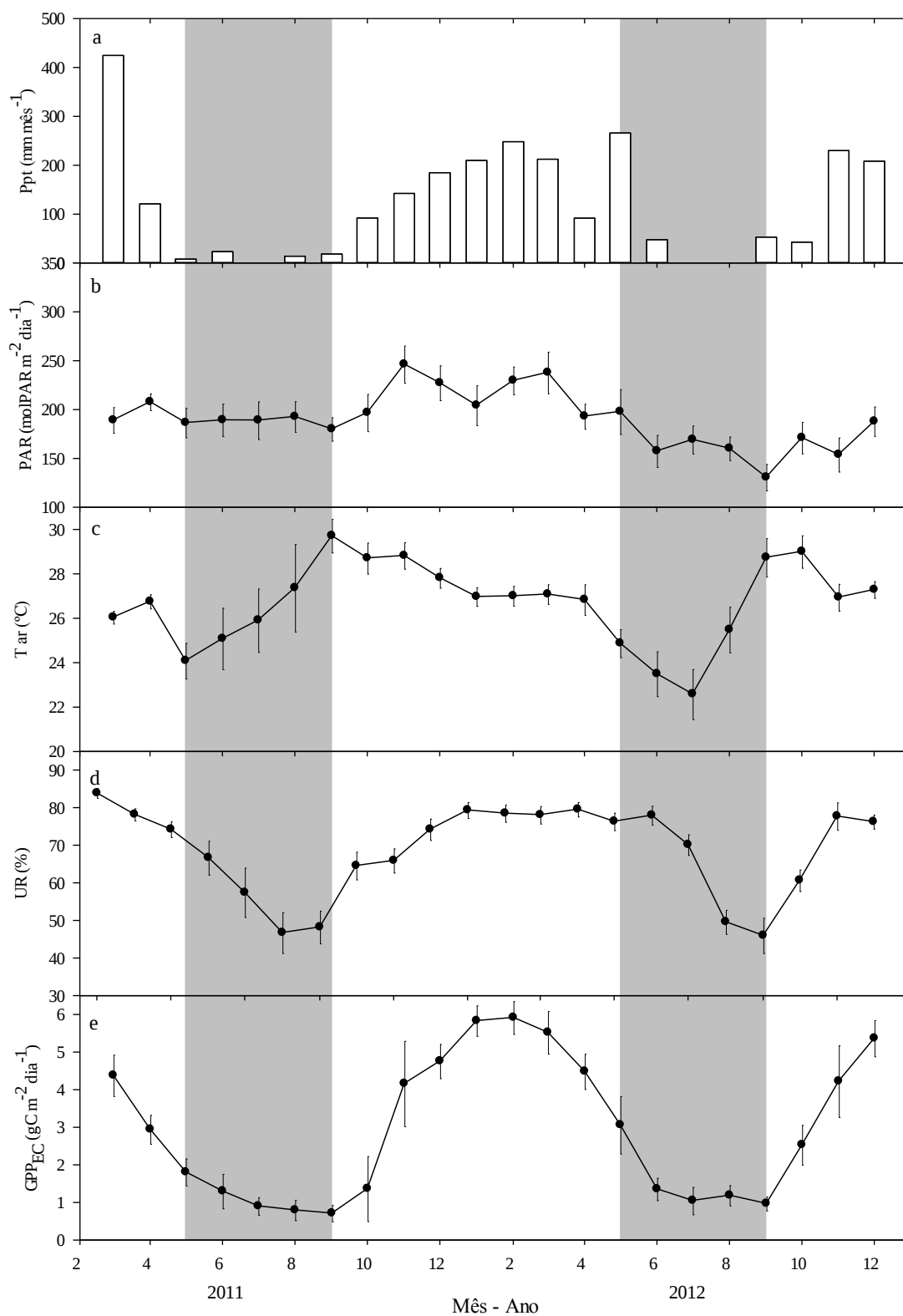


FIGURA 7: Média da precipitação total (a), Radiação fotossinteticamente ativa (b), temperatura do ar (c), umidade relativa (d) e produção Primária Bruta mensal (e) medido pelo método de Covariância Turbulenta (GPP_{EC}) para FMI.

TABELA 4: Total anual e sazonal da precipitação (Ppt, mm) e média ($\pm 95\%$ intervalo de confiança): temperatura do ar (T_{ar} , °C), radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa (%), deficit de pressão de vapor (DPV, kPa), eficiencia do uso da luz (ϵ_g , $\text{gC } \mu\text{mol PAR}^{-1}$), índice de vegetação melhorada (enhanced vegetation index - EVI), índice de vegetação por diferença normalizada (normalized difference vegetation index - NDVI), índice de água na superfície da terra (land surface water index - LSWI), temperatura da superfície terrestre (land surface temperature - LST, °C), produção primária bruta medido método de covariância turbulenta (GPP_{EC} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo TG (GPP_{TG} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), produção primária bruta estimada pelo modelo VI (GPP_{VI} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) com os índices EVI $\times$ NDVI e produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS} , $\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para FMI.

	2011			2012		
	Anual (mar-dez)	Seco	Chuvoso	Anual (jan-dez)	Seco	Chuvoso
Ppt	1028,4	63,3	965,1	1610,3	367,2	1243,1
T_{ar}	27,0 $\pm$ 0,8	26,4 $\pm$ 1,2	27,6 $\pm$ 0,4	26,3 $\pm$ 0,7	25,0 $\pm$ 0,9	27,3 $\pm$ 0,5
PAR	200,7 $\pm$ 15,6	187,8 $\pm$ 15,7	213,7 $\pm$ 15,5	183,1 $\pm$ 16,3	163,4 $\pm$ 15,8	197,1 $\pm$ 16,7
FPAR	0,44 $\pm$ 0,02	0,42 $\pm$ 0,02	0,47 $\pm$ 0,02	0,51 $\pm$ 0,03	0,48 $\pm$ 0,02	0,53 $\pm$ 0,03
UR	66,0 $\pm$ 3,5	58,7 $\pm$ 4,5	73,4 $\pm$ 2,5	70,8 $\pm$ 2,7	64,0 $\pm$ 3,0	75,7 $\pm$ 2,4
DPV	1,30 $\pm$ 0,18	1,58 $\pm$ 0,24	1,03 $\pm$ 0,12	1,05 $\pm$ 0,13	1,23 $\pm$ 0,14	0,91 $\pm$ 0,12
ϵ_g	0,03 $\pm$ 0,00	0,03 $\pm$ 0,00	0,04 $\pm$ 0,00	0,03 $\pm$ 0,00	0,03 $\pm$ 0,00	0,04 $\pm$ 0,00
EVI	0,48 $\pm$ 0,05	0,42 $\pm$ 0,04	0,54 $\pm$ 0,07	0,52 $\pm$ 0,06	0,48 $\pm$ 0,03	0,54 $\pm$ 0,08
NDVI	0,52 $\pm$ 0,04	0,46 $\pm$ 0,02	0,58 $\pm$ 0,05	0,53 $\pm$ 0,03	0,50 $\pm$ 0,02	0,55 $\pm$ 0,03
LSWI	-0,05 $\pm$ 0,04	-0,11 $\pm$ 0,03	0,02 $\pm$ 0,05	-0,01 $\pm$ 0,04	-0,07 $\pm$ 0,03	0,03 $\pm$ 0,05
LST	31,99 $\pm$ 1,26	33,35 $\pm$ 1,34	30,63 $\pm$ 1,18	31,26 $\pm$ 2,02	32,34 $\pm$ 1,91	30,50 $\pm$ 2,11
GPP_{EC}	2,3 $\pm$ 0,5	1,1 $\pm$ 0,3	3,5 $\pm$ 0,6	3,4 $\pm$ 0,4	1,5 $\pm$ 0,3	4,8 $\pm$ 0,5
GPP_{VPM}	3,0 $\pm$ 0,3	2,2 $\pm$ 0,3	3,8 $\pm$ 0,3	3,4 $\pm$ 0,4	2,3 $\pm$ 0,4	4,2 $\pm$ 0,4
GPP_{TG}	3,2 $\pm$ 0,0	2,4 $\pm$ 0,0	4,0 $\pm$ 0,0	3,6 $\pm$ 0,0	3,0 $\pm$ 0,0	4,0 $\pm$ 0,0
GPP_{VI}	4,2 $\pm$ 0,0	3,0 $\pm$ 0,0	5,4 $\pm$ 0,0	4,6 $\pm$ 0,0	3,5 $\pm$ 0,0	5,5 $\pm$ 0,0
GPP_{MODIS}	3,5 $\pm$ 0,4	2,4 $\pm$ 0,4	4,6 $\pm$ 0,4	4,3 $\pm$ 0,6	3,3 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,6

Para a pastagem em FMI, encontramos um comportamento inverso ao observado na floresta para a radiação fotossinteticamente ativa (Photosynthetically active radiation – PAR) sendo maior na estação chuvosa (FIGURA 7) (TABELA 4). Este é um fenômeno típico de biomas do cerrado, pois na estação seca, os aerossóis e a queima de biomassa seca podem reduzir a quantidade de radiação solar que chega a superfície (RODRIGUES et al., 2014; BIUDES et al., 2015).

O PAR máximo encontrado em FMI foi de $246,6 \text{ mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em novembro de 2011 e mínimo de $131,0 \text{ mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em setembro de 2012, sendo PAR médio de $191 \text{ mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) em FMI apresentou maiores valores para o ano de 2012 (TABELA 4). FPAR foi 10% maior na estação chuvosa para FMI, pelo mesmo fenômeno que ocorre com PAR, pois na seca o acúmulo de aerossóis e queimada diminui a quantidade de radiação que chega a superfície.

A umidade relativa (UR) varia entre 46% para 83% em FMI. A UR foi 17% maior na estação chuvosa para FMI, o que já era esperado devido a maior quantidade de precipitação neste período (FIGURA 7). A UR apresentou maiores valores no ano de 2012 para FMI (TABELA 4).

O déficit de pressão de vapor (DPV) variou anualmente em FMI entre 0,05 a 2,30 KPa. O DPV segue o inverso da tendência sazonal das chuvas para a região, sendo maior na estação seca. O DPV em FMI foi 31% maior na seca. Em ambas as regiões de estudo o DPV aumenta rapidamente nos meses que precedem o início do período chuvoso e decresce no período de chuva mais abundante.

Estas variações sazonais no DPV são semelhantes as encontradas em savanas tropicais no Brasil (GIAMBELLUCA, et al., 2009; RODRIGUES et al., 2014). O DPV é um fator importante, pois acredita-se que o estresse hídrico possa desencadear na liberação de uma grande quantidade de carbono na atmosfera (MAEDA et al., 2014), pois a planta fecha parcialmente ou total os estômatos, condicionando a entrada de mais CO_2 atmosférico.

A eficiência do uso da luz em FMI não variou ao longo dos anos (TABELA 4). Para a área de pastagem no cerrado ε_g foi 26% maior no período de chuva para os dois anos, com picos nos meses de maior precipitação.

A variação mensal da produção primária bruta GPP_{EC} apresentou uma tendência sazonal consistente para FMI, se mostrando positivamente afetado pelas chuvas, onde é possível ver o período de crescimento. GPP_{EC} foi 68% maior no período chuvoso para FMI. Também encontramos que do ano de 2011 para 2012 o GPP_{EC} aumenta

consideravelmente em relação ao ano anterior (TABELA 4).

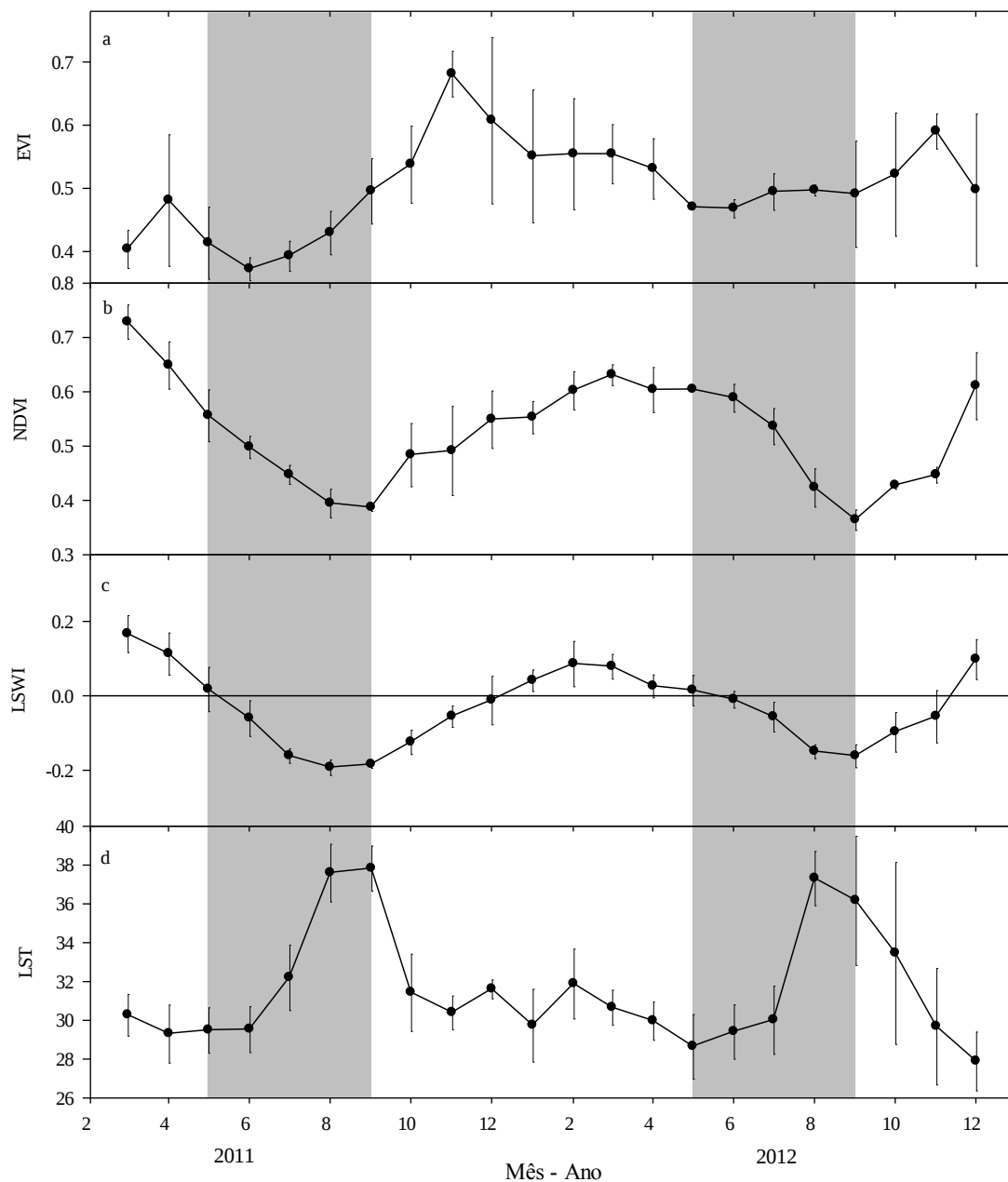


FIGURA 8: Média mensal dos índices de vegetação Enhanced Vegetation Index - EVI (a), Normalized Difference Vegetation Index - NDVI (b), Land Surface Water Index - LSWI (c) e do Land Surface Temperature - LST (d) para FMI.

TABELA 5: Matriz de correlação de Pearson de precipitação, temperature do ar (T_{ar} , °C), radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), umidade relativa (%), deficit de pressão de vapor (DPV, kPa), eficiencia do uso da luz (ϵ_g , gC $\mu\text{mol PAR}^{-1}$), índice de vegetação melhorada (enhanced vegetation index - EVI), índice de vegetação por diferença normalizada (normalized difference vegetation index - NDVI), índice de água na superfície da terra (land surface water index - LSWI), temperature da superfície terrestre (land surface temperature - LST, °C), produção primária bruta medido pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}), a produção primária bruta previsto pelo modelo de VPM (GPP_{VPM}), a produção primária bruta previsto pelo modelo TG (GPP_{TG}), a produção primária bruta prevista pelo modelo VI (GPP_{VI}) estimado pelo índice EVIxNDVI, e a produção primária bruta prevista pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS}) para FMI.

	Ppt	T_{ar}	PAR	FPAR	UR	DPV	ϵ_g	EVI _{MODIS}	NDVI	LSWI	LST	GPP_{EC}	GPP_{VPM}	GPP_{TG}	GPP_{VI}	GPP_{MODIS}
Ppt	1	0,11	0,38	0,27	0,66***	-0,57**	0,75***	0,25	0,66***	0,74***	-0,44*	0,78***	0,60**	0,46*	0,63**	0,56*
GPP_{EC}	0,78***	0,19	0,59**	0,58**	0,71***	-0,62**	0,78***	0,53*	0,60**	0,75***	-0,50*	1	0,84***	0,78***	0,88***	0,77***
GPP_{VPM}	0,60**	0,02	0,74***	0,80***	0,74***	-0,68***	0,76***	0,36	0,78***	0,84***	-0,57*	0,84***	1	0,65***	0,90***	0,88***
GPP_{TG}	0,46*	0,17	0,52*	0,57**	0,59**	-0,51*	0,62**	0,79***	0,39	0,49*	-0,60**	0,74***	0,65***	1	0,85***	0,70***
GPP_{VI}	0,63**	0,14	0,78***	0,66***	0,67***	-0,59**	0,77***	0,61**	0,64**	0,71***	-0,53*	0,88***	0,90***	0,85***	1	0,79***
GPP_{MODIS}	0,56*	-0,16	0,53*	0,87***	0,91***	-0,86***	0,73***	0,37*	0,80***	0,85***	-0,77***	0,77***	0,88***	0,70***	0,79***	1

* $p\text{-valor} < 0,05$; ** $p\text{-valor} < 0,01$; *** $p\text{-valor} < 0,001$

Estas tendências em FMI coincidem com as variações sazonais da precipitação, umidade relativa e a eficiência do uso da luz (TABELA 5). Pesquisas também tem demonstrado que existe uma correlação forte entre o potencial hídrico da planta e a fotossíntese para florestas tropicais (SENDAL et al., 2009), para o Cerrado (VOURLITIS e DA ROCHA, 2011) e em áreas de pastagens semi-áridas (SEAQUIST et al., 2003). E diferente do que encontramos em SIN, a produção primaria bruta em FMI é influenciada pela eficiência da luz, mas também altamente correlacionada com a precipitação, UR e DPV.

O GPP_{EC} em FMI quase atinge a zero no período de seca e o valor máximo encontrado foi de $5,90 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias}^{-1})$ em fevereiro de 2012. Este decréscimo de GPP_{EC} na estação seca é devido a pouca ou nenhuma disponibilidade de água na estação seca em FMI, o qual faz com que a pastagem praticamente seque neste período.

Logo ao início do período da chuva, temos que o GPP aumenta consideravelmente e só volta a diminuir próximo ao fim do período chuvoso na região, provavelmente porque no período da chuva, as plantas estão em processo de crescimento e consequentemente apresentam maior capacidade fotossintética, sendo que logo após este período a capacidade volta a diminuir (ROSA e SANO, 2013).

O índice de vegetação melhorada (enhance vegetation index – EVI) em FMI 16% maior na estação chuvosa (FIGURA 8). Os picos se deram nos meses de novembro para FMI os dois anos de estudo. Este aumento de EVI no período de chuva é consistente com o desenvolvimento de novas folhas, o aumento do índice de área foliar (IAF) e o aumento de concentração de nutrientes nas folhas que ocorrem tipicamente com a estação chuvosa (XIAO et al., 2005). Este é um padrão intimamente ligado ao Cerrado, mais do que com a Floresta Amazônica (SAMANTA et al., 2012).

O índices de vegetação de diferença normalizada (normalised difference vegetation index – NDVI) em FMI apresenta uma sazonalidade bem definida, sendo 15% maior no período chuvoso. Os mínimos em FMI são nos meses que antecedem a chuva e máximos entre fevereiro e abril (FIGURA 8).

O índice de água na superfície da terra (land surface water index – LSWI) em FMI apresenta uma sazonalidade bem definida, sendo 81% maior na estação chuvosa em FMI (FIGURA 6). LSWI na pastagem em FMI aumenta de 2011 para 2012, provavelmente devido o aumento da quantidade de chuva em 2012. O valor máximo encontrado foi de 0,17 em março de 2011, que corresponde ao mês de maior chuva ao longo do período de estudo.

LSWI apresenta valores negativos nos meses de junho a novembro para os dois

anos em FMI. Isto ocorre porque LSWI apresenta valores positivos para corpos d'água e negativos ou zero para solo e vegetação terrestre, sendo zero o limiar (JAIN et al., 2005). Para regiões de floresta, este comportamento muda, provavelmente devido a influencia do dossel da vegetação nas medições, então sensor orbital acaba medindo apenas o conteúdo de água nas folhas (SOUZA et al., 2014).

O índice temperatura da superfície terrestre (Land Surface Temperature – LST) é 7% maior na estação seca em FMI, sendo que LST é em média 31,5°C ao longo de todo o ano. LST varia de 27,9°C até 37,9°C em FMI, sendo que os máximos acontecem sempre no mês que antecede o início do período chuvoso (FIGURA 8).

4.3. Análise dos modelos testados na Floresta de transição Amazônia-Cerrado (SIN)

Em geral a produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (GPP_{VPM}) a partir de dados orbitais obtidos do sensor MODIS teve baixa correlação (-0,30) sem significância com o GPP_{EC} medido em SIN. Com coeficiente de Willmott – “d” de 0,16, EMA de $9,21 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$ e EQM de $10,53 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$. Isto quando testado com o valor da eficiência do uso da luz fixo, como é proposto pelo modelo VPM. O modelo VPM superestimou anualmente o GPP em média 105%, enquanto que na estação seca superestimou 156% e 73% na estação chuvosa em SIN

Quando consideramos a eficiência do uso da luz variável para mesma área em SIN, encontramos forte correlação entre GPP_{VPMvar} e GPP_{EC} , sendo de (0,97) com *p-valor* < 0.001 em SIN, e o coeficiente de Willmott – “d” igual a 0,99, EMA de $1,41 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$ e EQM de $1,48 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$. O modelo VPM superestimou anualmente o GPP em média 45%, enquanto que na estação seca superestimou 36% e 52% na estação chuvosa em SIN (FIGURA 8).

O GPP_{LAND} estimado em SIN com base em EVI das reflectâncias do satélite Landsat – 5 e eficiência do uso da luz também variável também concorda com o GPP_{EC} medido em SIN tanto em fase quanto magnitude (FIGURA 9) (DANELICHEN et al., 2015). O GPP_{LAND} apresenta coeficiente de Willmott “d” de 0,94, com MAE de $2,16 \text{ gC m}^{-2}$ e RSME de $3,12 \text{ gC m}^{-2}$. O GPP_{LAND} subestima GPP_{EC} em 21,4% (TABELA 6).

TABELA 6: coeficiente de Willmott “d”, EMA (erro média absoluto - $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$), EMQ (erro quadrado médio - $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e o coeficiente de determinação (R^2) para os modelos testados em SIN.

	d	EMA	EQM	R²
GPP_{VPM}	0,16	9,21	10,53	-0,08
GPP_{VPMvar}	0,99	1,41	1,48	0,92
GPP_{LAND}	0,94	2,16	3,12	0,85
GPP_{TG}	0,37	0,91	2,46	0,00
GPP_{VI (EVIxNDVI)}	0,11	10,41	12,07	0,09
GPP_{MODIS}	0,92	2,52	3,73	0,45

O modelo VPM já foi utilizado para prever a produção primária bruta em florestas decíduas temperadas (XIAO et al., 2004c; XIAO et al., 2004b), na floresta tropical da Amazônia (XIAO et al., 2005), e em áreas de cultivo (LI et al., 2007; WANG, et al., 2010). Uma dificuldade deste modelo é a dependência da eficiência do uso da luz para a estimativa de GPP. A eficiência do uso da luz varia ao longo do dia com mudanças nas condições ambientais, diferentes fases fenológicas e entre os tipos funcionais das plantas, portanto considera-lá fixo, como o modelo VPM propõe, pode agregar erros para a estimativa de GPP (GILTELSON et al., 2015).

Corroborando com Giltelson et al. (2015), quando admitimos que a eficiência do uso da luz é fixa, o modelo não responde bem a estimativa da produção primária bruta. De acordo com a Tabela 3, encontramos que a eficiência do uso da luz é a única variável limitante para GPP em SIN e apesar de haver uma sazonalidade de acordo com a precipitação, não encontramos correlação significativa entre elas, portanto, qualquer modelo testado em SIN que não leve em consideração a variabilidade da eficiência do uso da luz não apresentará resultados satisfatórios.

Apesar disso, o GPP_{VPM} com eficiência do uso da luz fixo apresentou correlação com PAR, a eficiência do uso da luz e EVI (TABELA 3). O $\text{GPP}_{\text{VPMvar}}$ apresentou correlação apenas com a eficiência do uso da luz de (0,86) com $p\text{-valor} < 0.001$, semelhante ao encontrado para a produção primária bruta medida em torre.

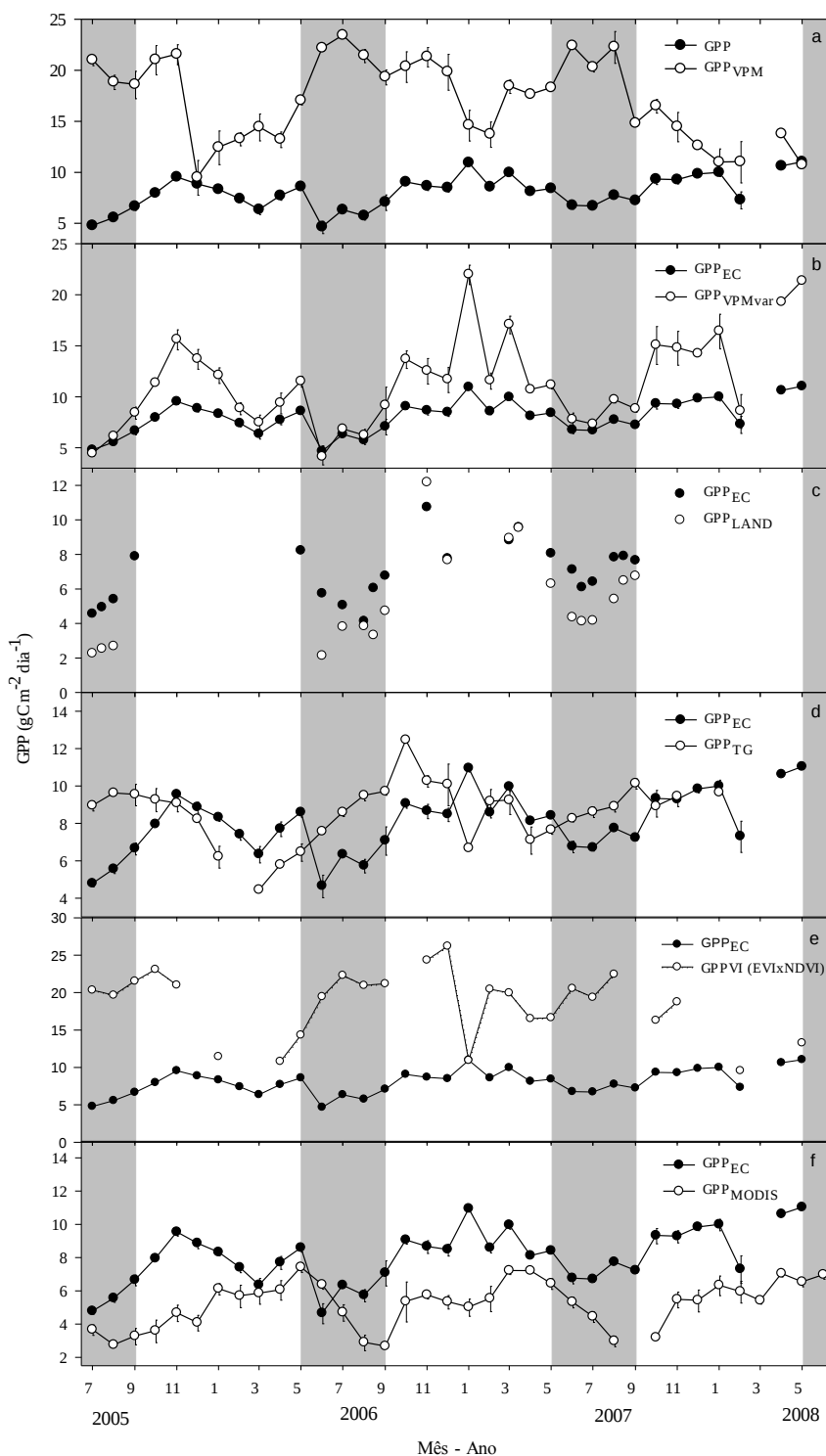


FIGURA 9: Média mensal da produção primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}) e (a) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (GPP_{VPM}), (b) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM variável (GPP_{VPMvar}), (c) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM com imagens Landsat 5 (GPP_{LAND}), (d) produção primária bruta estimada pelo modelo TG (GPP_{TG}), (e) produção primária bruta estimada pelo modelos VI (GPP_{VI}) e (f) produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 (GPP_{MODIS}) em SIN.

O GPP estimado pelo modelo TG (GPP_{TG}) não apresentou correlação significativa com o GPP_{EC} medido em SIN, e o coeficiente de Willmott “d” de 0,37, com EMA de $0,91gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$ e EQM de $2,46gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$ (TABELA 6). O modelo TG superestimou anualmente o GPP em SIN em média 9%, enquanto que na estação seca superestimou 3% e na estação chuvosa subestimou 1%.

O GPP_{TG} apresentou correlação com a eficiência do uso da luz, e também com PAR, EVI e LSWI, sendo todas significativas com $p\text{-valor} < 0,05$ (TABELA 3). Entretanto, apesar da correlação com a eficiência do uso da luz, o modelo TG não foi suficiente para estimar GPP_{EC} .

Provavelmente devido a não correlação entre EVI e LST com o GPP_{EC} em SIN, que são os principais fatores em evidência para a estimativa de GPP por meio do modelo TG. Temos que na estação seca a vegetação em SIN diminui sua fotossíntese, mas não o verdor, portanto modelos que levam em consideração índices de vegetação para descrever a fotossíntese, como o caso do modelo TG não respondem de maneira adequada.

Segundo Wang e Liang, (2009) a heterogeneidade do produto LST do MODIS prejudica o potencial do modelo TG, de forma que o produto LST esta na realidade medindo a temperatura do dossel e não as superfície, fato que provavelmente ocorreu em SIN.

O GPP estimado pelo modelo VI foi estimado por meio dos índices $EVI \times NDVI$ para ambas as áreas de estudo. O GPP_{VI} testado em SIN não apresentou correlação com GPP_{EC} (TABELA 3). Apesar da não correlação entre eles, temos que o GPP_{VI} apresentou correlação com a eficiência do uso da luz, EVI e PAR. Como o GPP_{EC} não apresenta correlação com os índices de vegetação EVI e NDVI, já era esperado que o modelo VI não representasse bem GPP_{EC} em SIN. Provavelmente por se tratar de uma floresta semi-descidua e que durante a seca a perda de folhas não é muito acentuada, os índices de vegetação não conseguem representar a sazonalidade de GPP em SIN.

O GPP_{VI} apresentou coeficiente de Willmott “d” de 0,11, com EMA de $10,41\ gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$ e EQM de $12,07\ gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$ (TABELA 6). O modelo VI superestima anualmente o GPP_{EC} em SIN em 252%, sendo 332% na estação seca e 195% na estação chuvosa.

Em geral, o GPP estimado pelo produto MOD17A2 não apresentou correlação significativa com o GPP_{EC} medido em SIN, e o coeficiente de Willmott “d” de 0,92, com EMA de $2,52gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$ e EQM de $3,73gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$. O GPP_{MODIS} subestimou em média 37% do GPP_{EC} em SIN. Sendo em média anual uma

subestimativa de 37%, sendo uma subestimativa de 35% na estação seca e 38% na estação chuvosa.

O produto MOD17A2 apresentou correlação com UR, DPV e LST que são variáveis utilizadas pelo MODIS para a estimativa de GPP. A baixa capacidade de produto MODIS para prever GPP é devido à inadequada maneira de caracterizar de a eficiência do uso da luz da floresta de transição Amazônia-Cerrado SIN, problema também encontrado nos outros modelos testados em SIN. O MOD17A2 utiliza tabelas de pesquisa de determinação da eficiência máxima do uso da luz para um determinado tipo de vegetação e o ajuste dos valores desta eficiência pode ser para baixo com base no fator de estresse ambiental (SIMS et al., 2006).

4.4. Análise dos Modelos testados na pastagem do Cerrado (FMI)

A produção primária bruta estatimada pelo modelos VPM (GPP_{VPM}) teve forte correlação com GPP_{EC} (0,84) com $p\text{-valor} < 0.001$, e o coeficiente de Willmott – “d” de 0,84, com EMA de $0,14gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$ e EQM de $1,33gC\ m^{-2}\ (8\ dias)^{-1}$ (TABELA 5) (TABELA 7). O modelo VPM superestimou anualmente o GPP em média 15%, sendo para a estação seca uma superestimativa de 76% e na estação chuvosa uma subestimativa de 2% (FIGURA 10).

Na pastagem no Cerrado (FMI) seguimos exatamente o proposto pelo modelo VPM com a eficiência do uso da luz fixa, pois com a eficiência do uso da luz fixa já obetvemos o resultado esperado. De acordo com a Tabela 5 o modelo VPM se mostrou correlacionado praticamente com todas as variáveis, somente não obtivemos correlação com Tar e com EVI, fato que também aconteceu com GPP_{EC} medido em FMI.

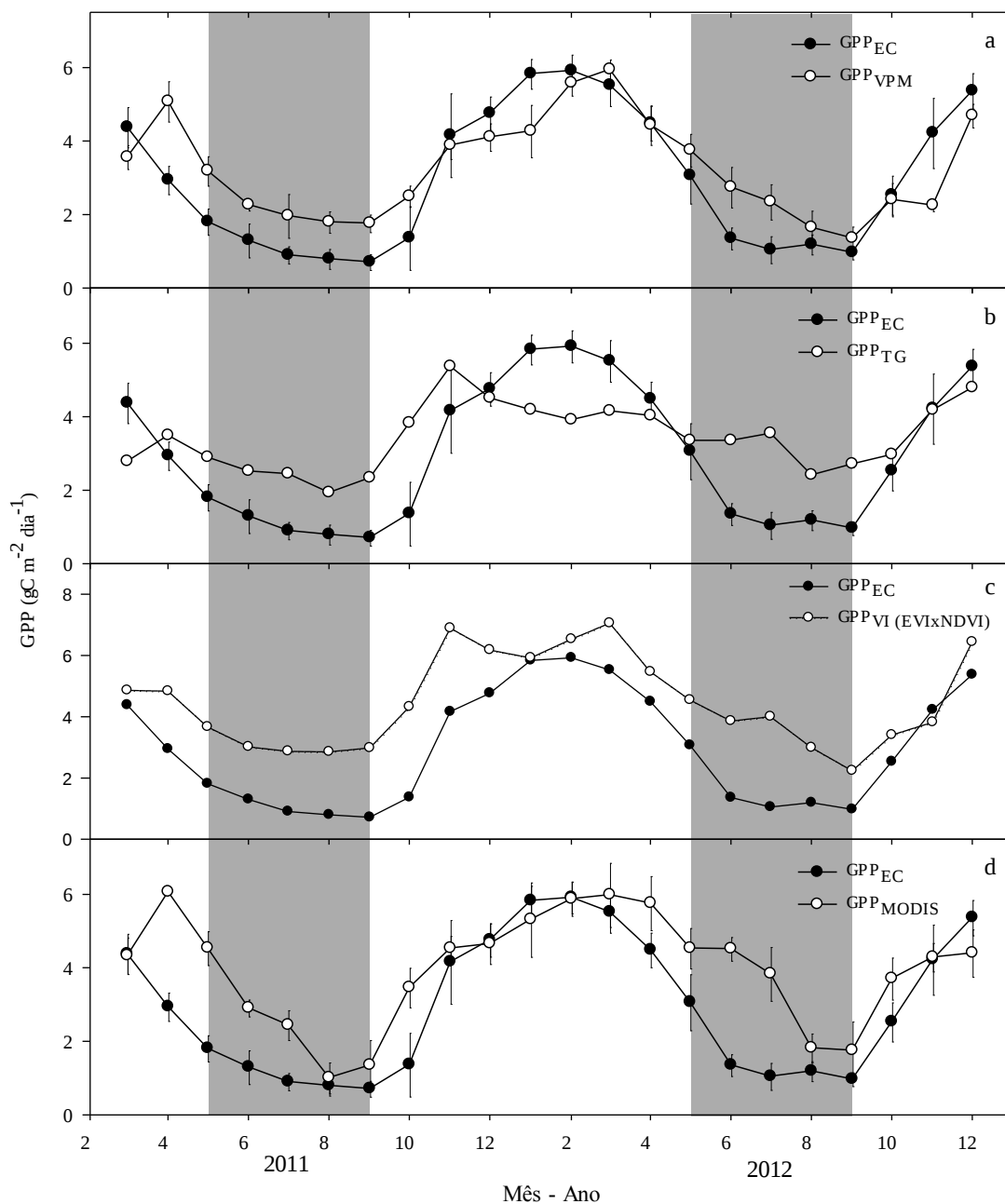


FIGURA 10: Média mensal da produção primária bruta medida pelo método de covariância turbulenta (GPP_{EC}) e (a) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM (GPP_{VPM}), (b) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM variável ($\text{GPP}_{\text{VPMVar}}$), (c) produção primária bruta estimada pelo modelo VPM com imagens Landsat 5 (GPP_{LAND}), (d) produção primária bruta estimada pelo modelo TG (GPP_{TG}), (e) produção primária bruta estimada pelo modelos VI (GPP_{VI}) e (f) produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 ($\text{GPP}_{\text{MODIS}}$) em FMI.

TABELA 7: coeficiente de Willmott “d”, EMA (erro média absoluto - $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$), EMQ (erro quadrado médio - $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e coeficiente de determinação (R^2) para os modelos testados em FMI.

	d	EMA	EQM	R²
GPP_{VPM}	0,84	0,14	1,33	0,71
GPP_{TG}	0,74	0,24	1,41	0,56
GPP_{VI (EVIxNDVI)}	0,79	1,31	1,67	0,78
GPP_{MODIS}	0,82	0,88	1,65	0,60

A produção primária bruta estimado pelo modelo TG (GPP_{TG}) apresentou boa correlação com o GPP_{EC} sendo de (0,74) com p - valor < 0.001 , e o coeficiente de Willmott “d” de 0,74, com EMA de $0,24 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$ e EQM de $1,41 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$. O modelo TG superestimou anualmente o GPP em FMI em média 21%, sendo uma superestimava de 110% na estação seca e subestima 1,5% na estação chuvosa.

O modelo TG em FMI foi mais influenciado por EVI e LST, apresentando correlação de (0,79) com p - valor < 0.001 e de (-0,60) com p - valor < 0.01 , respectivamente para os dados orbitais (TABELA 5). Segundo Sims et al. (2008), ao incorporar temperatura da superfície ao modelo (LST), ele consegue acompanhar os aspectos fisiológicos da vegetação, pois do ponto bioquímico e ambiental, GPP é afetado pelas folhas, componentes bioquímicos do dossel, radiação e variáveis climática.

A produção primária bruta estimada com o modelo VI (GPP_{VI}) em FMI apresentou correlação significativa com GPP_{EC} sendo de (0,88) com p -valor < 0.001 , utilizando os índices EVIxNDVI (TABELA 5). O coeficiente de Willmott “d” foi de 0,79, EMA de $1,31 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$ e EQM de $1,67 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$ (TABELA 7). O GPP_{VI} superestima em 59% o GPP_{EC}, sendo 154% maior no período seco e 33% maior na estação chuvosa. Os resultados mais satisfatórios para os modelos TG e VI em FMI provavelmente é devido a pastagem ser mais bem representada pelos índices de vegetação se comparado a uma floresta.

A produção primária bruta estimada pelo produto MOD17A2 apresentou boa correlação com o GPP (0,77) com p -valor < 0.001 medido em FMI (TABELA 5), e o coeficiente de Willmott “d” de 0,82, com EMA de $0,88 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$ e EQM de $1,65 \text{ gC m}^{-2} (8 \text{ dias})^{-1}$ (TABELA 7). O produto MOD17A2 superestimou anualmente o GPP em média 38%, sendo 118% na estação seca e enquanto que na estação chuvosa 17%.

Também encontramos boas correlações entre GPP_{MODIS} e os modelos de orbitais de estimativa de GPP (TABELA 5). Sendo de (0,88), (0,70) e (0,79) todos com p -valor $<$

0.001 para GPP_{VPM} , GPP_{TG} e GPP_{VI} respectivamente.

4.5. Comparação entre os modelos testados

O modelo VPM na floresta de transição Amazonia-Cerrado (SIN) foi testado de duas maneiras diferentes, sendo uma considerando a eficiência do uso da luz como um valor fixo (GPP_{VPM}) e outro considerando a variabilidade da eficiência do uso da luz (GPP_{VPMvar}). Também testamos em SIN o modelo VPM calculando os índices de vegetação com dados do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - Imagem espectralradiômetro de resolução moderada) e utilizando imagens do satélite Landsat 5 (GPP_{LAND}).

Considerando a variabilidade da eficiência do uso da luz, o modelo VPM apresenta resultados em potencial em SIN tanto por meio de dados do sensor MODIS como por imagens do satélite Landsat 5 (TABELA 3) (TABELA 6). Para a pastagem no Cerrado (FMI) encontramos resultados interessantes utilizando a proposta da eficiência do uso da luz fixa (TABELA 5) apesar de só testarmos o modelo VPM com dados orbitais do sensor MODIS, devido a indisponibilidade de dados do satélite Landsat 5 neste período de estudo para FMI.

Os modelos baseados apenas em dados de sensoriamento remoto em SIN, apesar de apresentarem correlações com a eficiência do uso da luz (TABELA 3), não demonstraram consistência para estimar GPP, provavelmente porque a floresta de transição Amazonia Cerrado, que é uma floresta semi-decídua, com folhas praticamente o ano todo, dificulta os índices de vegetação medirem as variações sazonais na vegetação, consequentemente não conseguem representar bem a eficiência do uso da luz em SIN e por isso interfere na resposta dos modelos.

Os modelos de sensores orbitais testados em FMI apresentam bons resultados. Tanto para o modelo TG, como o modelo VI (TABELA 5) (TABELA 7). Com coeficiente de Willmott semelhantes e erros baixos, ambos são modelos interessantes para a estimativa da produção primária bruta quando não existe a possibilidade de dados micrometeorológicos no local.

O produto MOD17A2 medido em SIN, apesar de ter um coeficiente de Willmott – “d” alto, não apresentou correlação entre com GPP_{EC} , provavelmente devido o produto MOD17A2 fixar o valor da eficiência da luz (TABELA 3). O produto MOD17A2 em FMI apresentou resultados interessantes com coeficiente de Willmott – “d” de 0,82 e correlação significativa.

Para o caso específico de SIN apenas a eficiência do uso da luz se mostrou decisiva na estimativa de GPP, pois os índices de vegetação não representam bem a sazonalidade da eficiência do uso da luz local e consequentemente GPP. Este comportamento se dá pela perda de folhas mais acentuada que ocorre em FMI no período da seca, portanto os modelos orbitais respondem melhor na pastagem do Cerrado FMI do que a floresta de transição em SIN. Os modelos testados em FMI apontam resultados semelhantes entre si, apresentando correlações maiores que 0,77 com *p-valor* < 0,001 em todos os modelos testados, sendo alternativas interessantes quando não se tem facilidade em algum dado em específico para a medida de GPP.

5. CONCLUSÃO

A produção primária bruta medida em torre (GPP_{EC}) apresenta padrão semelhante para ambas áreas experimentais, sendo maior na estação chuvosa e menor na seca, entretanto só encontramos correlação significativa entre a precipitação e GPP para o sítio experimental FMI.

Quanto aos índices de vegetação, encontramos sazonalidade apenas em FMI. Em SIN, os índices não apresentaram variação entre as estações provavelmente porque na estação seca não temos uma perda significativa de folhas na floresta de transição Amazônia-Cerrado, fato que acontece em FMI, pois na seca a fotossíntese chega a praticamente zero. Os modelos que utilizam apenas índices de vegetação para a estimativa de GPP em SIN não representaram bem a produção primária bruta local.

A variável mais decisiva sobre GPP em SIN é a eficiência do uso da luz, portanto modelos que levem em consideração a variação da eficiência do uso da luz, apresentam melhores resultados, como o caso do modelo GPP_{VPMvar} estimado com dados MODIS e o GPP_{LAND} estimado com imagens Landsat 5. Estes foram os únicos modelos que se destacaram em SIN. Em FMI todos os modelos apresentam resultados semelhantes, portanto em situações que não existem dados meteorológicos os modelos TG, VI e o produto MOD17A2 são alternativas interessantes para a estimativa de GPP, pois conseguem representar a sazonalidade do GPP no Cerrado.

Apesar dos resultados, ainda existe a necessidade de se aprofundar neste estudo de medidas de GPP por meio de diferentes métodos de sensoriamento remoto, diferentes índices de vegetação e diferentes locais para avaliar melhor o desempenho dos modelos testados.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar os modelos de estimativa da produção primária bruta (GPP) em diferentes tipos de cobertura vegetal para avaliar o comportamento e variações sazonais de GPP;
- Estudos mais aprofundados com uma série maior de dados temporais;
- Avaliar a utilização de diferentes índices de vegetação para estimar os modelos já aplicados, procurando resultados mais significativos;

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERLY, D., D.; THOMAS, W., W.; FERREIRA, C., A., C; PIRANI, J. R. The forest–cerrado transition zone in southern Amazonia: results of the 1985 Projecto Flora Amazonica Expedition to Mato Grosso. **Brittonia**, v. 41, p.113–128, 1989.

ANTHONI P., M.; LAW, B., E.; UNSWORTH, M., H. Carbon and watervapour exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 95, p.151–168, 1999.

ARAÚJO, A., C.; NOBRE, A., D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J., A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; RANDOW, C.; MANZI, A., O.; CULF, A., D.; GASH, J., H., C.; VALENTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 20-58, 2002.

ARAGÃO, L. E. O. C. **Modelagem dos padrões temporal e espacial da produtividade primária bruta na região do Tapajós: uma análise multi-escala.** 283p. Tese (Doutorado Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2004.

ARRUDA, J. C. **Estudo do fechamento do balanço de energia pelo método de Covariância de Vórtices Turbulentos em uma Floresta de Transição em Mato Grosso** 134p. (Tese Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPAIE, D. Eddy Covariance: **A Practical Guide to measurement and Data Analysis**. Springer, Germany, 438 p, 2012.

BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v.9, p.479-492, 2003.

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.

BIUDES, M., S.; NOGUEIRA, J., S.; DALMAGRO, H., J.; MACHADO, N., G.; DANIELICHEN, V., H., M.; SOUZA, M., C. Mudança no microclima provocada pela conversão de uma floresta de cambará em pastagem no norte do Pantanal. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 10, p. 61–68, 2012.

BIUDES, M., S.; MACHADO, N., G.; DANIELICHEN, V., H., M.; SOUZA, M., C.; VOURLITIS, G., L.; NOGUEIRA, J., S. Ground and Remote Sensing-Based Measurements of Leaf Area Index in a Transitional Forest and Seasonal Flooded Forest in Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, p. 1181-1193, 2013. doi:10.1007/s00484-013-0713-4.

BIUDES, M., S.; SOUZA, M., C.; MACHADO, N., G.; DANIELICHEN, V., H., M.; VOURLITIS, G., L.; NOGUEIRA, J., S. Modelling gross primary production of a tropical semi-deciduous forest in the southern Amazon Basin. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, p. 1540-1562, 2014.

BIUDES M., S.; VOURLITIS, G., L.; MACHADO, N., G.; ARRUDA, P., H., Z.; NEVES, G., A., R.; LOBO, F., A.; NEALE, C., M., U.; NOGUEIRA, J., S. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climategradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112–124, 2015.

BOARDMAN, N., K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 28, p. 355-377, 1977.

CARRILHO, S., B., P. **Avaliação de modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Cerrado Mato-Grossense**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

CHAPIN, F., S., WOODWELL, G., M., RANDERSON, J., T., RASTETTER, E., B., LOVETT, G., M., BALDOCCHI, D., D., CLARK, D., A., HARMON, M., E., SCHIMEL, D., S., VALENTINI, R., WIRTH, C., ABER, J., D., COLE, J., J., GOULDEN, M., L., HARDEN, J., W., HEIMANN, M., HOWARTH, R., W., MATSON, P., A., MCGUIRE, A., D., MELILLO, J., M., MOONEY, H., A., NEFF, J., C., HOUGHTON, R., A., PACE, M., L., RYAN, M., G., RUNNING, S., W., SALA, O., E., SCHLESINGER, W., H., SCHULZE, E., D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. **Ecosystems**, v 9, p. 1041-1050, 2006.

CHAPIN, F., S.; MATSON, P., A.; MOONEY, H., A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. 2 Edição. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 546p. 2011.

CHENG, Y., B., MIDDLETON, E., M., HILKER, T., COOPS, N., C., BLACK, T., A., e KRISHNAN, P. Dynamics of spectral bio-indicators and their correlations with light use efficiency using directional observations at a Douglas-fir forest. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 15, 2009.

DALMAGRO, H. J. **Dinâmica da Assimilação do Carbono em Brosimum lactescens S Moore (Moraceae) na Floresta de Transição Amazônia-Cerrado**. (2009). 75 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2009.

DALMAGRO, J., H.; ALMEIDA LOBO, F.; ORTÍZ, C., E., R.; BIUDES, M., S.; NOGUEIRA, J., S.; VOURLITIS, G., L.; PINTO JUNIOR, O., B. Trocas gasosas de uma espécie Lenhosa na floresta de transição Amazônia - cerrado. **Ciência e Natura**, v.33, n. 2, p. 147-165., 2011.

DANELICHEN, V., H., M.; BIUDES, M., S.; VELASQUE, M., C., S.; MACHADO, N., G.; GOMES, R., S., R.; VOURLITIS, G., L.; NOGUEIRA, J., S. Estimating of gross primary production in an Amazon-Cerradotransitional forest using MODIS and Landsat imagery. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.87, p. 1545-1564, 2015. doi: 10.1590/0001-3765201520140457.

DOMINGUES, A., N., DE ABREU, J., G., CANEPPELE, C., DOS REIS, R., H., P., NETO, A., B., DE ALMEIDA, C., M. Agronomic characteristics of corn hybrids for silage pro-duction in the State of Mato Grosso, Brazil. **Acta Scientiarum**, v 35, p. 7–12, 2013. doi:10.4025/actascianimsci.v35i1.15592.

DROLET, G., G., HUEMMRICH, K., F., HALL, F., G., MIDDLETON, E., M., BLACK, T., A., BARR, A., G., MARGOLIS, H., A. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. **Remote Sensing of Environment**, v.98, p.212–224, 2005.

DROLET, G. G., MIDDLETON, E. M., HUEMMRICH, K. F., HALL, F. G., AMIRO, B. D., BARR, A. G., BLACK, T., A.; MCCAUGHEY, J., H.; MARGOLIS, H., A. Regional mapping of gross light-use efficiency using MODIS spectral indices. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3064–3078, 2008.

EMBRAPA - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 306 p. 2006

EROS do Active Archive Center. In: EDC DAAC. **Base de dados MODIS**. Disponível em: http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl.

FALGE, E., D. BALDOCCHI, R., J. OLSON, P. ANTHONI, M.; AUBINET, C.; BERNHOFER, G.; BURBA, G.; CEULEMANS, R.; CLEMENT, H.; DOLMAN, A.; GRANIER, P.; GROSS, T.; GRUNWALD, D.; HOLLINGER, N., O.; JENSEN, G.; KATUL, P.; KERONEN, A.; KOWALSKI, C., T.; LAI, B., E.; LAW, T.; MEYERS, J.; MONCRIEFF, E.; MOORS, J., W.; MUNGER, K.; PILEGAARD, U.; RANNIK, C.; REBMANN, A.; SUYKER, J.; TENHUNEN, K.; TU, S.; VERMA, T.; VESALA, K.; WILSON; WOFSY. Gap Filling Strategies for Long Term Energy Flux Data Sets. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p. 71–77, 2001. doi:10.1016/S0168-1923(00) 00235-5.

FAUSTO, M. A. **Análise de parâmetros biofísicos estimados pelo algoritmo sebal em áreas de cerrado na bacia do alto rio paraguai**. 57 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

FEARNSIDE, F., M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, p. 23–38, 2001.

FERREIRA, J.; BLANC, L.; KANASHIRO, M.; LEES, A., C.; BOURGOIN, C.; FREITAS, V., F.; GAMA, M., B.; LAURENT, F.; MARTINS, M., L.; MOURA, N.; OLIVEIRA, M., V.; SOTTA, E., D.; SOUZA, C., R.; RUSHEL, A., R.; SCHWARTS, G.; ZWERTS, J.; SIST, P. Degradação florestal na Amazônia: como ultrapassar os limites conceituais, científicos e técnicos para mudar esse cenário. **Embrapa Amazônia Oriental**. Belém, PA : Embrapa Amazônia Oriental, 2015. 29 p. 2015.

FLORENZANO, T., G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 128 p. 2011.

GEBREMICHAEL, M.; BARROSS A., P. Evaluation of MODIS gross primary productivity (GPP) in tropical monsoon regions. **Remote Sensing of Environment**, v.100, p.150–166, 2006.

GHIL, M., M. R. ALLEN, M., D.; DETTINGER, K.; IDE, D.; KONDRASHOV, M, E.; MANN, M., E.; ROBERTSON, A., W.; SAUNDERS, Y., T.; VARADI, F.; MANN, M., E. Advanced spectral methods for climatic time series. **Reviews of Geophysics**, v 40, p. 3-41, 2002. doi: 10.1029/2000RG000092.

GIAMBELLUCA, T., W, SCHOLZ F., G, BUCCI, S., J, MEINZER, F., C, GOLDSTEIN, G, HOFFMANN, W., A, FRANCO, A., C, BUCHERT, M., P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilians Savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v 149, p. 1365-1376, 2009. doi: 10.1016/j.agrformet.2009.03.006.

GITELSON, A., A., VIÑA, A., VERMA, S., B., RUNDQUIST, D., C., ARKEBAUER, T., J., KEYDAN, G.; LEAVIT, B.; CIGANDA, V., BURBA, G., G.; SUYKER, A. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. **Journal of Geophysical Research**, v.111, p. 1984-2012, 2006.

GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; WRIGHT, I.; GASH, J. Fluxes of carbono dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. **Global Change Biology**, v.1, p. 1-12, 1995.

GRACE, J.; MALHI, Y.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.C.; MEIR, P.; MIRANDA, H.,S. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. **Global Change Biology**, v.2, p. 209-217, 1996.

GOLYANDINA, N.; OSIPOVA, E. The "Caterpillar"-SSA method for analysis of time series with missing values. **Journal of Statistical Planning and Inference**, v. 137, p. 2642-2653, 2007.

HERMANCE, J. F., JACOB, R. W., BRADLEY, B. A., MUSTARD, J. F. MUSTARD. Extracting phenological signals from multiyear A VHRR NDVI time series: Framework for applying high-order annual splines. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Society**, v. 45, p. 3264- 3276, 2007.

HIRD, J. N.; G. J. MCDERRNID. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 248-258, 2009. doi: 10.1016/j.rse.2008.09.003.

HOLLINGER, D., Y.; KELLIHER, F., M.; BYERS, J., N.; HUNT, J., E. ; MCSEVENY, T., M.; WEIR, P., L. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. **Ecology**, v. 75, p. 134-150, 1994.

HUETE, A. R., LIU, H., Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A Comparison of Vegetation Indices Global Set of TM Images for EOSMODIS. **Remote Sensing of Environment**, v 59, p. 440– 451, 1997. doi:10.1016/S0034-4257(96)00112-5. 1997.

INOUE, Y., PEÑUELAS, J., MIYATA, A., MANO, M. Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO₂ flux measurements in rice. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.156–172, 2008.

IPCC, 2007: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996p. 2007.

JAIN, S. K.; JAIN, S.,M., K.; LOHANI, A., K. Delineation of Flood-Prone Areas Using Remote Sensing Techniques. **Water Resources Management**, v.19, p.333–347, 2005.

JENSEN, J., R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2a ed., São José dos Campos: Parêntese, 604 p. 2009.

JIANG Z.; HUETE, A., R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing Environment**, v. 112, p. 3833-3845, 2008.

KIRSCHBAUM, M., U., F.; EAMUS, D.; GIFFORD, R., M.; ROXBURGH, S., H.; SANDS, P., J. Definitions of some ecological terms commonly used in carbon accounting. **Net Ecosystem Exchange**. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting. Australia. v 1, p. 2-9, 2001.

KLINK, C., A.; SOLBRIG, O., T. **Biodiversidad y Funcionamiento de Pastizales y Sabanas e América Latina**. SARMIENTO, G. e CABIDO, M. (eds). CYTED y CIELAT, Venezuela, 1996.

LI, Z., YU, G.; XIAO, X.; LI, Y.; ZHAO, X., REN, C.; ZHANG, L.; FU, Y. Modeling Gross Primary Production of Alpine Ecosystems in the Tibetan Plateau Using MODIS Images and Climate Data. **Remote Sensing of Environment**, v 107, p. 510–519, 2007. doi:10.1016/j.rse.2006.10.003.

LIU, J.; SUN O., J., JIN, H., ZHOU, Z.; HAN, X. Application of two remote sensing GPP algorithms at a semiarid grassland site of North China. **Journal of Plant Ecology**. v 4, p. 302–312, 2011.

MAEDA, E., E.; HEISKANEN, J; ARAGÃO, L., E., O., C; RINNE, J. Can MODIS EVI monitor ecosystem productivity in the Amazon rainforest? **Geophysical Research Letters**. v 41, p. 7176-7183, 2014. doi:10.1002/2014GL061535.

MALHI, Y.; WRIGHT, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Philosophical Transactions of The Royal Society B**, v. 359, p. 311-329, 2006.

MALHI, Y.; NOBRE, A., D.; GRACE, J., KRUIJT, B.; PEREIRA, M., G., P.; SCOTT, S. **Carbon dioxide transfer over a Amazonian rain Forest**. Jornal of Geophysical Research, v. 103, p.31593- 31612, 1998.

MARENGO, J., A., NOBRE, C., A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M., D.; DE OLIVEIRA, G., S.; DE OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L., M.; BROWN, I., F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal Climate**, v. 21, p. 495–516, 2008.

MCMILLEN, R. T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 43, p. 231-425, 1988.

MENESES, P.; R.; ALMEIDA, T.; ROSA, A., N., C., S.; SANO, E., E.; SOUZA, E., B.; BAPTISTA, G., M., M.; BRITES, R., S. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. CNPQ. Brasília. 2012.

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

NAKAJI, T., IDE, R., OGUMA, H., SAIGUSA, N., FUJINUMA, Y. Utility of spectral vegetation index for estimation of gross CO₂ flux under varied sky conditions. **Remote Sensing of Environment**, v.109, p.274–284, 2007.

NEPSTAD, D., C.; CARVALHO, C., R.; DAVIDSON, E., A.; JIPP, P., H.; PAUL, A., L., NEGREIROS, G., H.; SILVA, E., D.; STONE, T., A.; TRUMBORE, S., E.; VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pasture. **Nature**, v. 372, p.666-669, 1994.

NEPSTAD, D., C.; STICKLER, C., M.; SOARES-FILHO, B.; MERRY, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. **Philosophical Transactions of The Royal Society B**, v. 363, p.1737-1746, 2008.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory. Disponível em <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>> Acesso em 01/08/2014.

OLIVEIRA, C. L. **Estimativa da dinâmica de carbono na biomassa lenhosa de terra-firme na reserva de desenvolvimento sustentável Amanã por métodos dendrocronológicos**. 53 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2009.

OLIVEIRA, L., M., M.; MONTENEGRO, S., M., G., L.; DANTAS, A., C.; SILVA, B., B.; MACHADO, C., C., C.; GALVÍNCIO, J., D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográficas obtidos por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1209-1217, 2012.

PEREIRA, O. A. **Determinação do fluxo de CO_2 numa área Monodominante de cambará no norte do Pantanal mato-grossense**. 58 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental)– Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá 2009.

PRENTICE, I., C., FARQUHAR, G., D., FASHAM, M., J., R., GOULDEN, M., L., HEIMANN, M., JARAMILLO, V., J., KHESHGI, H., S., LEQUERE, C., SCHOLTES, R. J., E.; WALLACE, D., W., R. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. (eds. HOUGHTON, J. T. DING, Y. GRIGGS, D. J. NOGUER, M. VAN DER LINDEN, P. J. DAI, X. MASKELL, K. e JOHNSON, C. A.). Cambridge University Press, Cambridge, p. 183-237, 2001.

PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G., L.; HAYASHI, M., M., S.; NOGUEIRA, J., S.; CAMPELO JR, J., H.; NUNES, P., C.; SANCHES, L.; COUTO, E., G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J., L.; MIRANDA, E., J.; PRIANTE, P., C.; PEREIRA, L., C.; BIUDES, M., S.; FRITZEN, C., L.; LACERDA, M.; SULI, G., S.; SHIRAIWA, S.; SILVEIRA, M. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, v. 10, p. 863-876, 2004.

RADAMBRASIL, 1982. Levantamentos dos Recursos Naturais Ministério das Minas de Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SD 21 Cuiabá, Rio de Janeiro, Brazil.

RAICH, J., W., RASTETTER, E., B., MELILLO, J., M., KICKLIGHTER, D., W., STEUDLER, P., A., PETERSON, B., J., GRACE, A., L., MOORE III, B., VOROSMARTY, J. Potential net primary productivity in South-America-application of a global-model. **Ecological Applications**, v. 1, p.399– 429, 1991.

RESTREPO-COUBE, N.; HUETE, A.; DAVIES, K.; CLEVERLY, J.; BERINGER, J.; EAMUS, D.; VAN GORSEL, E.; HUTLEY, L., B.; MEYER, W., S. MODIS vegetation products as proxies of photosynthetic potential: a look across meteorological and biologic driven ecosystem productivity. **Biogeosciences Discussions**, v 12, p. 19213–19267, 2015. doi:10.5194/bgd-12-19213-2015.

RIBEIRO, J., F.; WALTER, B., M., T. Fitofisionomias do bioma cerrado. p.89-166. In: S. M. Sano, S. P. Almeida (Eds.). **Cerrado: Ambiente e Flora**. Embrapa CPAC. Planaltina. 1998.

ROBERTS, D., A., NELSON, B., W., ADAMS, J., B., PALMER, F. Spectral changes with leaf aging in Amazon caatinga. Trees-Structure and Function. **Biomedical and life sciences**, v. 12, p. 315– 325, 1998.

RODRIGUES, T., R.; VOURLITIS, G., L.; ALMEIDA LOBO, F.; OLIVEIRA, R., O.; NOGUEIRA, J., S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south central Mato Grosso, Brazil. **Journal of geophysical research: biogeosciences**, v. 119, p.1–13, 2014. doi:10.1002/2013JG002472.

RODRIGUES, T. R. **Análise de parâmetros biofísicos que controlam o fluxo de calor latente em área de cerrado campo sujo**. 2014. 95p. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá 2014.

ROSSINI, M., COGLIAT, S., MERONI, M., MIGLIAVACCA, M., GALVAGNO, M., BUSETTO, L., CREMONESE, E., JULITTA, T., SINISCALCO, C., MORRA DI CELLA, U., COLOMBO, R. Remote sensing-based estimation of gross primary production in a subalpine grassland. **Biogeosciences**, v. 9, p.2565–2584, 2012. doi:10.5194/bg-9-2565-2012.

ROSA, R.; SANO, E., E.; Determinação da produtividade primária líquida (npp) de pastagens na bacia do rio paranaíba, usando imagens MODIS. **GeoFocus (Artículos)**, v, 13, p. 367-395, 2013.

RUIVO, M., D. **Fluxos de Carbono, Energia e vapor de água numa pastagem Alentejana**. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro. 2008.

SAATCHI, S., S.; HARRIS, N., L.; BROWN, S. LEFSKY, M.; MITCHARD, E., T., A.; SALAS, W.; ZUTTA, B., R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S., L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **PNAS**, v. 108, p. 9899-9904, 2011.

SAMANTA, A., Y.; KNYAZIKHIN, L.; XU, R., E.; DICKINSON, R.; FU, M., H.; COSTA, S., S.; SAATCHI, R., R.; NEMANI, R., MYNENI., B. Seasonal changes in leaf area of Amazon forests from leaf flushing and abscission. **Journal of Geophysical Research**, v 117. 2012. doi: 10.1029/2011JG001818.

SANCHES, L.; VALENTINI, C., M., A.; PINTO JUNIOR, O., B.; NOGUEIRA, J., S.; VOURLITIS, G., L.; BIUDES, M., S.; SILVA, C., J.; BAMBI, P.; ALMEIDA LOBO, F. Seasonal and interannual litter dynamics of a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin, Brazil. **Journal of geophysical research**, v. 113, p. 1-9, 2008.

SANCHES, L.; VALENTINI, C., M., A.; BIUDES, M., S.; NOGUEIRA, J., S. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serapilheira em floresta tropical de transição. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 183-189, 2009.

SEAQUIST, J. W.; OLSSON, L.; ARDO, J. A remote sensing-based primary production model for grassland biomes. **Ecological Modelling**. V,169. p 131–155, 2003.

SENDALL, M., M., VOURLITIS, G., L.; ALMEIDA LOBO, F. Seasonal variation in the maximum rate of leaf gas exchange of canopy and understory tree species in an Amazonian semi-deciduous forest. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 21, p. 65-74, 2009.

SILVA, B., B.; GALVINCIO, J., D.; MONTENEGRO, S., M., G., L.; MACHADO, C. C., C.; OLIVEIRA, L., M., M.; MOURA, M., S., B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo – PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, p. 57 – 64, 2013.

SIMS, D., A.; RAHMAN, A., F.; CORDOVA, V., D.; BALDOCCHI, D., D.; FLANAGAN, L., B.; GOLDSTEIN, A., H.; HOLLINGER, D., Y.; MISSION, L.; MONSON, R., K.; SCHMID, H., P.; WOFSY, S., C.; XU, L. Midday values of gross CO₂ flux and light use efficiency during satellite overpasses can be used to directly estimate eight-day mean flux. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 131, p. 1-12. 2006.

SIMS, D., A., RAHMAN, A., F., CORDOVA, V., D., EL-MASRI, B., Z., BALDOCCHI, D., D., BOLSTAD, P., V., FLANAGAN, L., B.; GOLDSTEIN, A. H.; HOLLINGER, D., Y.; MISSION, L.; MONSON, R., K.; OECHEL, W., C.; SCHMID, H., P.; WOFSY, S., C.; XU, L. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.1633–1646, 2008.

SOUZA, M., C., BIUDES, M., S., DANIELICHEN, V., H., M., MACHADO, N., G., DE MUSIS C., R., VOURLITIS, G., L.; NOGUEIRA, J., S. Estimation of gross primary production of the Amazon-Cerrado Transitional Forest by remote sensing techniques. **Revista Brasileira Meteorologia**, v 29, p. 1-12, 2014.

TANNUS, R. N. **Funcionalidade e sazonalidade sobre o Cerrado e sobre ecótono Floresta-Cerrado: uma investigação com dados micrometeorológicos de energia e CO₂**. 2004. 92f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas). Escola Superior de Agricultura Luiz e Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

THENKABAIL, P. S. Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing, **Remote Sensing Handbook**. 1 ed. CRC Press, 2015. 849 p. 2015.

TURNER, D., P., OLLINGER, S., V., KIMBALL, J., S. Integrating remote sensing and ecosystem process models for landscape- to regional-scale analysis of the carbon cycle. **BioScience**, v 54, p. 573–584, 2004.

VELASQUE, M. C. S. **Estimativa da variação anual da Produção primária bruta em floresta de Transição amazônica-cerrado**. 42 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental)– Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

VETRITA, Y.; CHAOYANG, W.; ZHENG, N.; HIRANO, T. Evaluation of light use efficiency model using modis in tropical peat swamp forest, Indonesia. In: Second cresos International Symposium on south east Asia environmental problems and satellite remote sensing, Indonesia, p. 127-134. 2011.

VILANI, M.T. **Estimativa da fapar utilizando três métodos para uma floresta de transição amazônia-cerrado**. 88 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Cuiabá, 2004.

VILANI, M., T., SANCHES, L., NOGUEIRA, J., S., PRIANTE FILHO, N. Sazonalidade da radiação, temperatura e umidade em uma floresta de transição Amazônia cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v 21, p. 119-131, 2006.

VOURLITIS, G., L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M., S.; NOGUEIRA, J., S.; CASEIRO, F., T.; CAMPELO JR, J., H. Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian tropical forest (cerradão). **Functional Ecology**. v. 15, p. 388-395, 2001.

VOURLITIS, G., L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M., M., S.; NOGUEIRA, J. de S.; CASEIRO, F., T.; CAMPELO JR, J., H. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resources Research**, v. 38, p. 1-11, 2002.

VOURLITIS, G., L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M., M., S.; NOGUEIRA, J. de S.; RAITER, F.; HOEGER, W.; CAMPELO JR, J., H. Effects of meteorological variations of the CO₂ exchange of a Brazilian transitional tropical Forest. **Ecological Applications**, v. 14, p. 89-100, 2004.

VOURLITIS, G., L., NOGUEIRA, J., S.; PRIANTE-FILHO, N.; HOEGER, W.; RAITER, F.; BIUDES, M., S.; ARRUDA, J., C.; CAPISTRANO, V., B.; FARIA, J., L., B.; ALMEIDA LOBO, F. The sensitivity of diel CO₂ and H₂O vapor exchange of a tropical transitional forest to seasonal variation in meteorology and water availability. **Earth Interactions**, v. 9, p. 9-27, 2005.

VOURLITIS, G., L., NOGUEIRA, J., S., LOBO, F., A., SENDALL, K., M., DE FARIA, J., L., B.; DIAS, C., A., A., ANDRADE, N., L., R. Energy balance and canopy conductance of a tropical semi-deciduous forest of the Southern Amazon Basin. **Water Resources. Research**, v.44, 2008. W03412. doi: 10.1029/2006 WR005526.

VOURLITIS, G., L.; DA ROCHA, H., R. Flux dynamics in the Cerrado and Cerrado-Forest Transition of Brazil. 2010. In: Ecosystem Function in Global Savannas: Measurement and Modeling at Landscape to Global Scales. (eds. Hill, M.J. e Hanan, NP). Boca Raton, FL, USA, p. 97-116, 2010.

VOURLITIS, G., L.; LOBO, F., A.; ZEIHLOFER, P.; NOGUEIRA, J., S. Temporal patterns of net CO₂ exchange for a tropical semi-deciduous forest of the Southern Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research**, v.116, p. 1-15, 2011.

VOURLITIS, G., L., LOBO, F., A., LAWRENCE, S., LUCENA, I., C., BORGES JR., O., B., DALMAGRO, H., J., ORTIZ, C., E., R., NOGUEIRA, J., S. Variations in stand structure and diversity along a soil fertility gradient in a Brazilian savanna (Cerrado) in southern Mato Grosso. **Soil Science Society of America**, v. 77, p. 1370–1379, 2013. doi:10.2136/sssaj2012.0336.

VOURLITIS, G., L., NOGUEIRA, J., S., LOBO, F., A., PINTO JR., O., B. Variations in evapo-transpiration and climate for an Amazonian semi-deciduous forest overseasonal, annual, and El Niño cycles. **International Journal of Biometeorology**, v 59, p. 217-230, 2014. doi: [dx.doi.org/10.1007/s00484-014-0837-1](https://doi.org/10.1007/s00484-014-0837-1).

XIAO, X., BOLES, S., LIU, J. Y., ZHUANG, D. F.; LIU, M. L. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. **Remote Sensing of Environment**, v 82, p. 335– 348, 2002.

XIAO, X., BRASWELL, B., ZHANG, Q., BOLES, S., FROLKING, S., MOORE, B. Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: Continental- scale observations in northern Asia. **Remote Sensing of Environment**, v 84, p. 385– 392, 2003.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; HOLLINGER, D.; ABER, J.; MOORE III, B. Modeling seasonal dynamics of gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS images and climate data. **Ecological Applications**, v. 15, p. 954-969, 2004a.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFSY, S.; MOORE III, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v 91, p. 256–270, 2004b.

XIAO, X., HOLLINGER, D., ABER, J., GOLTZ, M., DAVIDSON, E.A., ZHANG, Q., MOORE, B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, p. 519–534, 2004c.

XIAO, X.; ZHANG, Q.; SALESKA, S.; HUTYRA, L.; DE CAMARGO, P.; WOFSY, S.; FROLKING, S.; BOLES, S.; KELLER, M.; MOORE B. Satellite-based Modeling of Gross Primary Production in a Seasonally Moist Tropical Evergreen Forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p.105– 122, 2005.

WAGLE, P.; XIAO, X.; SUYKER, A. E. Estimation and analysis of gross primary production of soybean under various management practices and drought conditions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 99. p 70-83, 2015.

WANG, K.; LIANG, S. Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface longwave radiation observations at SURFRAD sites. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.1556–1565, 2009.

WEBB, E., K.; PEARMAN, G., I.; LEUNING, R. Corrections of flux measurements for density effects due water vapor transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.106, p.85-100, 1980.

WILLMOTT, C., J.; CKLESON, S., G.; DAVIS, R., E.; FEDDEMA, J., J.; KLINK, K., M.; LEGATES, D., R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C., M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

WILLMOTT, C.J.; MATSSURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v.30, p.79-92, 2005.

WOHLFAHRT, G., C. ANFANG, M. BAHN, A. HASLWANTER, C. NEWSELY, M. SCHMITT, M. DROSLER, J. PFADENHAEUR, CERNUSCA, A. Quantifying Nighttime Ecosystem Respiration of a Meadow Using Eddy Covariance, Chambers and Modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, p. 141–162, 2005. doi:10.1016/j.agrformet.2004.11.003.

WU, C.; MUNGER, J.W.; NIU, Z.; KUANG, D. Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.2925-2939, 2010.

WU, C., J. M. CHEN.; N. HUANG. 2011. Predicting Gross Primary Production from the Enhanced Vegetation Index and Photosynthetically Active Radiation: Evaluation and Calibration. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p.3424–3435, 2011. doi:10.1016/j.rse.2011.08.006.

WU, C.; ZHENG, N.; GAO, S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize. **Journal of geophysical research**, v. 115. D12127, 2010. doi:10.1029/2009JD013023.

ZEILHOFER, P., SANCHES, L., VOURLITIS, G., L., ANDRADE, N., L., R. Seasonal variations in litter production and its relation with MODIS vegetation indices in a semi-deciduous forest of Mato Grosso. **Remote Sensing Letters**, v. 3, p. 1-9, 2011.