



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E**  
**GEODINÂMICA**

**LUÍSA RESENDE ROCHA**

**MODELAGEM PARA DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM**  
**PAISAGENS NATURAIS E ANTRÓPICAS NA REGIÃO AMAZÔNICA A**  
**PARTIR DE DADOS DO SENSOR MODIS**

Dissertação de Mestrado

*Área de Concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental*

Brasília – DF

Abril de 2018

**LUÍSA RESENDE ROCHA**

**MODELAGEM PARA DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM  
PAISAGENS NATURAIS E ANTRÓPICAS NA REGIÃO AMAZÔNICA A  
PARTIR DE DADOS DO SENSOR MODIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, cuja área de concentração é Geoprocessamento e Análise Ambiental.

**Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista**

Orientador

Brasília – DF

2018

**LUÍSA RESENDE ROCHA**

**MODELAGEM PARA DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM  
PAISAGENS NATURAIS E ANTRÓPICAS NA REGIÃO AMAZÔNICA A  
PARTIR DE DADOS DO SENSOR MODIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, cuja área de concentração é Geoprocessamento e Análise Ambiental.

03 de abril de 2018

---

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Orientador – UnB)

---

Prof. Dr. Edson Eyji Sano (Embrapa Cerrado)

---

Dr. Suzy Cristina Pedroza da Silva (UFAM/AM)

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

*Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito.*

*Martin Luther King Jr.*

---

*Mas aquele que pratica a verdade, vem para a luz. Torna-se assim claro que as suas obras são feitas em Deus.*

*João 3:21*

## AGRADECIMENTOS

Foi uma longa gestação e finalmente nasceu essa dissertação, meu filhotinho de elefante!!

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas. Alguns sem mesmo saber me inspiraram, outros ajudaram apenas com palavras de apoio e outras com ensinamentos que de alguma forma se refletem nesse trabalho.

A minha amada família e amigos por estarem sempre ao meu lado, fonte de apoio incondicional, vocês fizeram tudo valer a pena! Dentre todas essas pessoas, uma merece destaque, minha mãe, por todo amor, cuidado, dedicação e incentivo em todas as etapas da minha vida. A eles dedico esse trabalho!

Agradeço aos meus colegas do Serviço Florestal Brasileiro, Carlos Fabiano, Charton, Cláudio, Eduardo, Isabela, Jeison e Sérgio. Especialmente ao meu gerente José Humberto Chaves pela liberação para o término no trabalho.

A todos os professores do instituto de geociências que compartilharam tão generosamente seus conhecimentos.

À banca examinadora, Edson Sano e Suzy, que aceitaram o convite para participar da avaliação desse estudo e contribuíram com significativas observações. Particularmente, agradeço o professor Sano por ter colaborado também na etapa de qualificação. E a Suzy, que gentilmente disponibilizou dados que auxiliaram na pesquisa.

Ao meu orientador Gustavo por acreditar no meu potencial para a realização desse trabalho. Obrigada pelos ensinamentos, paciência em todos os momentos e leveza na orientação.

Aos meus colegas de mestrado Amanda, Bruno, Deorgia, Ilanna, Fernando, Khalil, Mayara, Thamiris e Thaise, por dividiram seus conhecimentos e multiplicaram meu ânimo.

Agradeço, acima de tudo e todos a Deus, por ter me dado força para concluir esse mestrado. E por ter colocado no meu caminho todas essas pessoas que fizeram parte dessa jornada. Muito obrigada!!

## RESUMO

A Floresta Amazônica é responsável por diversos serviços ambientais essenciais para a manutenção do equilíbrio ambiental regional, dentre eles destaca-se a participação no ciclo do carbono. O fluxo de CO<sub>2</sub> pode ser medido diretamente nas florestas utilizando técnicas meteorológicas e também pode ser estimado indiretamente por meio do sensoriamento remoto observando o comportamento espectral da vegetação. As estações micrometeorológicas presentes na região amazônica são insuficientes para compreender a dinâmica do fluxo de carbono para toda a região, dessa forma, essas devem ser combinadas com as ferramentas do sensoriamento remoto. O objetivo geral dessa pesquisa consistiu em analisar a potencialidade do sensor multiespectral MODIS para estimar fluxo de CO<sub>2</sub> em paisagens antrópicas e naturais por meio de índices espectrais obtidos pela análise das imagens de satélite e validados empregando os dados das torres micrometeorológicas de 3 sítios experimentais do programa LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera - Atmosfera na Amazônia). Foram utilizados os índices (NDVI, EVI, EVI2 e sPRI) e o Índice do Sequestro Florestal de Carbono (CO<sub>2</sub>flux) que é obtido pela integração do NDVI, EVI e EVI2 com o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI). O estudo foi desenvolvido na Reserva Biológica do Jaru (RO), em uma área de pastagem (RO) e na Floresta Nacional do Tapajós (PA). Foram utilizados dois produtos do MODIS TERRA, MOD21KM e MOD09, sendo que o segundo é disponibilizado com correção atmosférica. O melhor ajuste foi obtido para o índice sPRI calculado a partir das bandas 1 e 11 das imagens sem correção atmosférica associados com os dados de fluxo de carbono das torres mais próximos do horário de passagem do sensor. Em seguida os melhores resultados foram obtidos pelo índice CO<sub>2</sub>flux. Os coeficientes de determinação das equações mostraram que as modelagens apresentaram um poder preditivo moderado e o melhor ajuste expressa que 60% do fluxo de CO<sub>2</sub> medidos nas torres são explicados pelo índice sPRI.

**Palavras chaves:** Floresta Amazônica, Fluxo de Carbono, Sensor MODIS.

## ABSTRACT

The Amazon Forest is responsible for several environmental services to maintain the regional environmental balance, among them the participation in the carbon cycle. The CO<sub>2</sub> flux can be directly measured in forests using meteorological techniques and can also be estimated indirectly through remote sensing by observing the spectral behavior of the vegetation. The existing micrometeorological sites in the Amazon region are insufficient to understand the dynamics of the carbon flux for the entire region, so these must be combined with the remote sensing tools. The general aim of this research was to analyze the potential of the MODIS multispectral sensor to estimate CO<sub>2</sub> flux in natural and anthropic landscapes in the Brazilian Amazon. The carbon sink was estimated using the spectral indices obtained by satellite image analysis and validated using data from the micrometeorological towers of the LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) from 3 experimental stations. We tested the indices (NDVI, EVI, EVI2 and sPRI) and CO<sub>2</sub>flux (Index of Carbon Forest Sequestration), obtained using the integration of NDVI, EVI and EVI2 with the Index of Photochemical Reflectance (PRI). The study was developed in the Jaru Biological Reserve (RO), in a pasture area (RO) and in the Tapajós National Forest (PA). Two products of MODIS TERRA, MOD21KM and MOD09 were used, the second one differs for being atmospherically corrected. The best fitting was showed for the PRI index calculated from bands 1 and 11 of the images without atmospheric correction associated with the carbon flux data of the towers closest to the sensor's time of passage. After that, the best results were obtained by the CO<sub>2</sub>flux index. The coefficients of determination of the equations showed that the models presented a moderate predictive power and the best fit expressed that 60% of the CO<sub>2</sub> flux measured in the towers are explained by the sPRI index.

**Key words:** Brazilian Amazon, Carbon Flux, MODIS Sensor.



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1 Amazônia e Ciclo de Carbono.....	15
2.1.1 Projeto LBA.....	18
2.2 Comportamento Espectral da Vegetação.....	20
2.3 Índices de Vegetação .....	22
2.3.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI .....	23
2.3.2 Índices de Vegetação Melhorado - EVI e EVI2 .....	24
2.3.3 Índice de sequestro florestal de carbono - CO <sub>2</sub> flux .....	25
2.4 Sensor MODIS .....	27
2.5 Estado da Arte sobre Balanço Energético da Vegetação.....	31
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 Caracterização da área de estudo.....	36
3.1.1 Reserva Biológica do Jaru .....	37
3.1.2 Fazenda Nossa Senhora .....	39
3.1.3 Torre km 83 - Floresta Nacional do Tapajós .....	40
3.2 Processamento de Imagens do Sensor MODIS .....	42
3.3 Sistema <i>Eddy Covariance</i> .....	46
3.4 Análise Estatística .....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
4.1 Índices de vegetação.....	48
4.2 Fluxos de Carbono das Torres Micrometeorológicas.....	54
4.3 Modelagem do Sequestro de Carbono.....	58
4.3.1 Análise da Normalidade.....	58
4.3.2 Análise dos Índices de Vegetação: NDVI, EVI, EVI2 e sPRI.....	61
4.3.3 Análise do CO <sub>2</sub> flux .....	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Localização das torres micrometeorológicas: FNS (RO), Rebio Jaru (RO) e Flona Tapajós (PA).....	36
<b>Figura 2</b> – A - Vista da floresta do sítio observacional do LBA na Reserva Biológica do Jaru. ....	39
<b>Figura 3</b> - Sítio experimental Fazenda Nossa Senhora (RO). ....	40
<b>Figura 4</b> – A - Vista do Sítio experimental Km 83 na Flona Tapajós (PA). B - Trilha em direção à torre micrometeorológica. Fonte: ICMBIO, 2017. ....	42
<b>Figura 5</b> – Gráficos de dispersão dos índices de vegetação para cenas da região amazônica com correção atmosférica (MOD09) e sem correção atmosférica (MOD21KM). A – Índice NDVI; B – Índice EVI; C – Índice – EVI2. ....	49
<b>Figura 6</b> – Comportamento dos índices de vegetação NDVI, EVI e EVI2 para as imagens do sensor MODIS com correção atmosférica (MOD09) e sem correção atmosférica (MOD021KM). ....	52
<b>Figura 7</b> - Relação linear entre os índices de vegetação NDVI com os índices EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica (MOD09) e sem correção atmosférica (MOD021KM).....	53
<b>Figura 8</b> – Médias ao longo do dia do fluxo de CO <sub>2</sub> em áreas da região amazônica obtidos por meio de medições de torres micrometeorológicas: A – pastagem (RO), B – floresta nativa (RO) e C - manejo florestal (PA). As caixas verticais contêm 50% dos valores encontrados incluindo a mediana para cada horário, enquanto os pontos que estão fora das caixas são considerados valores discrepantes.....	56
<b>Figura 9</b> - Ajustes dos índices sPRI <sub>1</sub> , sPRI <sub>4</sub> , sPRI <sub>12</sub> , sPRI <sub>13</sub> , NDVI, EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de CO <sub>2</sub> com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	62
<b>Figura 10</b> - Ajustes dos índices sPRI <sub>1</sub> , sPRI <sub>4</sub> , sPRI <sub>12</sub> , sPRI <sub>13</sub> , NDVI, EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de CO <sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	63
<b>Figura 11</b> - Ajuste dos índices sPRI <sub>1</sub> , sPRI <sub>4</sub> , sPRI <sub>12</sub> , sPRI <sub>13</sub> , NDVI, EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica com dados do fluxo de CO <sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor. ....	64
<b>Figura 12</b> - Ajustes dos índices sPRI <sub>1</sub> , sPRI <sub>4</sub> , sPRI <sub>12</sub> , sPRI <sub>13</sub> , NDVI, EVI e EVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de fluxo de CO <sub>2</sub> com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	65

<b>Figura 13</b> - Ajustes do índice sPRI <sub>1</sub> , sPRI <sub>4</sub> , sPRI <sub>12</sub> , sPRI <sub>13</sub> , NDVI, EVI e EVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de CO <sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	66
<b>Figura 14</b> - Ajustes do índice sPRI <sub>1</sub> , sPRI <sub>4</sub> , sPRI <sub>12</sub> , sPRI <sub>13</sub> , NDVI, EVI e EVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de CO <sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor. ....	67
<b>Figura 15</b> - Ajustes do índice CO <sub>2</sub> flux <sub>1</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>12</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>13</sub> , CO <sub>2</sub> fluxEVI e CO <sub>2</sub> fluxEVI2 para imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de CO <sub>2</sub> com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	70
<b>Figura 16</b> - Ajustes do índice CO <sub>2</sub> flux <sub>1</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>12</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>13</sub> , CO <sub>2</sub> fluxEVI e CO <sub>2</sub> fluxEVI2 para imagens com correção atmosférica com dados de CO <sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	71
<b>Figura 17</b> - Ajuste do índice CO <sub>2</sub> flux <sub>1</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>12</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>13</sub> , CO <sub>2</sub> fluxEVI, CO <sub>2</sub> fluxEVI2 para imagens com correção atmosférica com dados do fluxo de CO <sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor. ....	72
<b>Figura 18</b> - Ajustes do índice CO <sub>2</sub> flux <sub>1</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>12</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>13</sub> , CO <sub>2</sub> fluxEVI, CO <sub>2</sub> fluxEVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados do fluxo de CO <sub>2</sub> com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	73
<b>Figura 19</b> - Ajustes do índice CO <sub>2</sub> flux <sub>1</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>12</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>13</sub> , CO <sub>2</sub> fluxEVI e CO <sub>2</sub> fluxEVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de fluxo de CO <sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor. ....	74
<b>Figura 20</b> - Ajustes do índice CO <sub>2</sub> flux <sub>1</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>12</sub> , CO <sub>2</sub> flux <sub>13</sub> , CO <sub>2</sub> fluxEVI e CO <sub>2</sub> fluxEVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de fluxo de CO <sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor. ....	75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Alguns produtos disponíveis do sensor MODIS. ....	29
<b>Tabela 2</b> - Termos relacionados ao Balanço Energético da Vegetação. ....	31
<b>Tabela 3</b> - Torres micrometeorológicas de medição do fluxo de CO <sub>2</sub> selecionadas. ....	37
<b>Tabela 4</b> – Especificações das Bandas 1 a 16 do sensor MODIS. ....	44
<b>Tabela 5</b> – Fórmulas dos índices de vegetação e nomenclatura dos índices utilizados no estudo. ....	45
<b>Tabela 6</b> – Análise descritiva para os índices de vegetação. ....	51
<b>Tabela 7</b> – Teste de Normalidade Shapiro-Wilk (W) para os índices espectrais e dados das torres micrometeorológicas. ....	59
<b>Tabela 8</b> – Teste Wilcoxon-Mann-Whitney (U) para os índices espectrais e fluxo de carbono. ....	60
<b>Tabela 9</b> – Coeficientes de determinação das equações que relacionam o fluxo de carbono com os índices de vegetação. ....	68
<b>Tabela 10</b> – Coeficientes de determinação dos modelos de sequestro de carbono. ....	76

## 1 INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica contém o maior reservatório de carbono entre os ecossistemas terrestres e tem uma função fundamental na mitigação das mudanças climáticas em curso. Nesse contexto, o bioma passou a ser alvo de investigações para conhecimento do seu papel no sequestro, armazenamento e liberação do carbono. A compreensão da influência das florestas no ciclo do carbono implica na necessidade de estimar a quantidade de carbono efetivamente absorvido e armazenado pelas florestas. A vegetação tem uma estreita relação com a atmosfera, controlando uma série de processos físico-químicos que influenciam a taxa de formação de nuvens, quantidade de vapor de água, balanço de radiação, emissão de gases biogênicos e de efeito estufa, entre tantas outras propriedades (ARTAXO et al., 2014).

O fluxo de dióxido de carbono pode ser medido diretamente em áreas de vegetação ou áreas antropizadas utilizando técnicas meteorológicas e pode ser estimado indiretamente por meio da análise dos índices de vegetação de imagens de satélite, que são baseados no comportamento espectral da vegetação (PEDROZA DA SILVA, 2014). Inúmeros estudos têm sido elaborados na Europa e América do Norte para encontrar um vínculo entre os índices espectrais e os dados dos sítios experimentais meteorológicos, que medem em campo o fluxo de carbono. Para essa finalidade, o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) tem sido amplamente utilizado, apresentando resultados bem promissores (DROLET et al., 2005; GARBULSKY et al., 2008; GOERNER et al., 2011).

Os dados provenientes do sensor MODIS, em especial os referentes aos índices de vegetação EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) são, atualmente, importantes ferramentas de análise e monitoramento da superfície terrestre, em virtude de sua alta resolução temporal (COUTO JUNIOR et al., 2011).

Rahman et al. (2000) propuseram um índice específico para estimar o sequestro de carbono pela vegetação, baseado na integração de dois índices de vegetação, o PRI (*Photochemical Reflectance Index*) com o NDVI. Baptista (2003) denominou esse índice integrado de CO<sub>2</sub>flux (Índice de Sequestro Florestal de Carbono).

Aguiar et al. (2006) ressaltaram que os valores dos fluxos de CO<sub>2</sub> apresentam uma grande variabilidade sazonal e do ciclo diurno, dessa forma estudos com séries

mais longas de dados permitem resultados mais conclusivos quanto ao balanço de carbono na Floresta Amazônica.

A região amazônica possui desde a década de 90, torres micrometeorológicas que coletam dados de concentração e fluxo de CO<sub>2</sub>. A maioria dessas torres foram instaladas no âmbito do programa “Experimento de Grande Escala da Biosfera - Atmosfera na Amazônia” (*Large Scale Biosphere - Atmosphere Experiment in Amazonia* – LBA). O programa LBA engloba diversas áreas de estudo com o objetivo de compreender o funcionamento do ecossistema Amazônico e os efeitos das mudanças na cobertura do solo nos processos biológicos, químicos e físicos da floresta, e o desenvolvimento sustentável na região, além de sua interação com o clima regional e global (LBA, 2007).

O programa contava no ano de 2017 com dados de uma rede de 13 torres micrometeorológicas ativas e de outras 10 desativadas na região amazônica (LBA, 2017). Essa quantidade de torres é pequena para região, sendo insuficiente para contemplar as particularidades do bioma. No entanto, esses sítios experimentais são oportunidades de validar os dados obtidos por meio de imagens de satélite, utilizando modelos para estimar o fluxo de carbono que ainda são incipientes na região.

Assim, tendo em vista a dificuldade de medir diretamente o fluxo de CO<sub>2</sub> na região amazônica, devido a sua grande extensão e difícil acessibilidade, este estudo justifica-se por buscar novas metodologias para estimar esse fluxo de forma mais precisa e com dados de imagens de fácil aquisição. A obtenção e disponibilidade dos dados de fluxo de CO<sub>2</sub> serão fundamentais quando o mercado de créditos de carbono estiver consolidado e para a valorização da conservação do bioma.

O objetivo geral desta pesquisa consistiu em analisar a potencialidade do sensor MODIS para estimar o fluxo de CO<sub>2</sub> em paisagens naturais e antrópicas na região amazônica. Os resultados obtidos por meio dos índices espectrais foram validados com as medições contínuas das torres micrometeorológicas do programa LBA.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Verificar os índices de vegetação (NDVI, EVI, EVI2, CO<sub>2</sub>flux) mais adequadas para determinar o sequestro de carbono;
- Estimar o fluxo de CO<sub>2</sub> utilizando índices espectrais obtidos das imagens do MODIS e relacionar com os dados coletados pelas torres micrometeorológicas e testar uma modelagem para prever o sequestro de carbono.

- Verificar os índices de vegetação (NDVI, EVI e EVI2) e as bandas do sensor MODIS mais adequadas para o cálculo do índice CO<sub>2</sub>flux;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Amazônia e Ciclo de Carbono

A extensa área de floresta tropical úmida da Amazônia desempenha um importante papel na regulação do clima regional e até mesmo global, ao executar suas funções biológicas de evapotranspiração, fotossíntese e respiração. Dentre eles, destaca-se a injeção de uma enorme quantidade de vapor de água para a atmosfera e retenção de parte do gás carbônico atmosférico (AGUIAR et al., 2006).

A quantidade de vapor d'água que é fornecida para a atmosfera possui intensidades diferentes na estação seca e chuvosa, ao contrário do que se acreditava inicialmente. Durante a estação chuvosa é liberado uma menor quantidade de vapor d'água, pois o sombreamento das nuvens reduz a energia solar disponível para as plantas realizarem fotossíntese e transpirar. Na estação seca, as raízes profundas das árvores retiram do solo a água necessária e não há restrição de radiação solar (ARTAXO et al., 2014).

Não há dúvida de que o bioma amazônico tem uma considerável contribuição no ciclo do carbono, participa com cerca de um terço da atividade metabólica total da superfície terrestre, principalmente devido à grande quantidade de carbono armazenado em sua biomassa e aos processos que envolvem o fluxo de carbono (fotossíntese, respiração, decomposição e queima de biomassa). Assim, a compreensão dos fatores condutores dos processos de fotossíntese e respiração da floresta tropical e da alocação dos produtos da fotossíntese para as diferentes estruturas da planta, dossel, tecido lenhoso e rizosfera, são importantes para entender o funcionamento do ecossistema global (LUYSSAERT et al., 2007; MALHI, 2012).

A compreensão da dinâmica do ciclo do CO<sub>2</sub> evoluiu bastante nas últimas décadas com a ampliação da utilização da técnica de *eddy covariance*. Estudos em torres micrometeorológicas revelam significativa acumulação de carbono em florestas tropicais (PEDROZA DA SILVA, 2014; ANDREAE et al., 2015). No entanto, a complexidade que envolve todo esse processo não permitiu inferir conclusões precisas capazes de prever as situações em que o bioma pode ser considerado sumidouro de



carbono e o destino do carbono sequestrado para períodos curtos e longos (OMETTO et al., 2005).

Apesar da Floresta Amazônica ser considerada por muitas pessoas um maciço florestal homogêneo, existe heterogeneidade do comportamento de alguns parâmetros que influenciam na absorção do carbono, tais como, precipitação, radiação solar, fluxo de nutrientes, topografia, características do solo, características do ecossistema (por exemplo, índice da área foliar e idade). Essas diferenças ocasionam numa grande variação dos valores de fluxos de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo, dessa forma é recomendado realizar pesquisas com séries temporais mais longas (AGUIAR et al., 2006).

A radiação solar é responsável por controlar a troca de carbono entre a superfície da terra e a atmosfera. Na presença da luz do sol, a vegetação emite e absorve CO<sub>2</sub> simultaneamente e durante a noite só a respiração com a liberação de carbono é mantida. Assim, a concentração de carbono na camada da atmosfera imediatamente acima da vegetação é maior no começo da manhã e, durante o dia, em razão da fotossíntese, a concentração de carbono tende a diminuir (HERRMANN; FREITAS, 2011).

As mudanças climáticas irão modificar os parâmetros que atuam na intensidade da absorção de carbono pela vegetação. Temperaturas mais elevadas aumentarão o período da estação de crescimento e as taxas metabólicas das vegetações de altas latitudes e altitudes. No entanto, em áreas mais quentes podem ocorrer a redução da produtividade ocasionada pelo aumento das taxas de evaporação. Em relação ao nível de CO<sub>2</sub> atmosférico, seu aumento tenderá a elevar a taxa de fotossíntese e reduzir a evapotranspiração (FRIEND et al., 2014).

De acordo com Andreae et al. (2015), dados de 25 anos do projeto RAINFOR indicam redução de um terço na capacidade da floresta nativa em absorver carbono em comparação com a década de 90. Isso parece ser impulsionado pela intensificação do desmatamento e pelo aumento da mortalidade da biomassa causada pela variabilidade climática. Observados juntos, os dados do projeto sugerem que a Bacia Amazônica está num frágil equilíbrio entre ser fonte ou sumidouro de carbono para a atmosfera mundial, com seu futuro dependendo da intensidade das mudanças climáticas.

Segundo Philips e Brien (2017), o monitoramento de florestas maduras em diversos países do bioma Amazônia entre 1980 e 2010 demonstrou que essas florestas estão longe do equilíbrio, com taxas de crescimento maiores que a taxa de mortalidade, e ambas as taxas estão em constante crescimento. Dessa forma, as florestas prestam

serviço de sequestrar carbono da atmosfera, servindo para mitigar as emissões de carbono devido ao desmatamento e emissões de combustíveis fósseis. No entanto, a partir do ano 2000 algumas regiões enfraqueceram o poder de absorção de carbono.

De forma geral, em anos sem eventos atípicos, como seca extrema ou prolongada, a floresta possui um balanço positivo de absorção de carbono, compensando as emissões de CO<sub>2</sub> advindos do desmatamento e queimadas na região. Entretanto, grandes secas na Amazônia, como as de 2005 e 2010, mostraram que o bioma pode exercer papel temporário de fonte emissora de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. As secas propiciam um ambiente favorável à ocorrência de incêndios e provocam a morte de muitas árvores (ARTAXO et al., 2014).

Conforme Wagner et al. (2016), a sazonalidade da assimilação e alocação de carbono por meio da capacidade fotossintética e da produtividade de biomassa é diretamente relacionada ao clima em regiões de florestas tropicais. Regiões sem limitações anuais de água exibem atividades de absorção e armazenamento de carbono não relacionadas, o que evidencia a complexidade do efeito da sazonalidade no comportamento da absorção de carbono nas árvores tropicais.

A atmosfera acima das florestas tropicais desempenha uma função muito ativa nos ciclos biogeoquímicos que são criticamente importantes para os processos que mantêm o ecossistema. As partículas de aerossol são componentes essenciais da atmosfera e participam no controle do ambiente climático e ecológico na Amazônia. O balanço radiativo é influenciado diretamente ou indiretamente pelas partículas de aerossol, isso acontece porque os aerossóis interagem com a radiação solar, refletindo uma parcela da luz e assim a vegetação irá receber menos radiação solar direta. Por outro lado, essas partículas aumentam a fração de radiação difusa, que é de fundamental importância para os processos que ocorrem nas camadas internas da copa das árvores, tais como, a liberação de oxigênio pela fotossíntese e a produção de vários gases de menores proporções na atmosfera, destacando-se os compostos orgânicos voláteis (ARTAXO et al., 2009).

Existem partículas de aerossol que atuam como núcleos de condensação de nuvens, interferindo na formação e dinâmica das nuvens, com o potencial de mudar os regimes de precipitação sobre a Amazônia. Durante a estação úmida, a Amazônia é uma das poucas regiões em que as partículas de aerossóis podem ser observadas em condições naturais. Na estação seca, as mudanças do uso da terra, especialmente queimadas, alteram a emissão de gases para a atmosfera e aumentam a concentração dos

aerossóis, conseqüentemente afetam o equilíbrio radioativo, ciclo hidrológico e o albedo (ARTAXO et al., 2009).

As trocas de carbono medidas por torres que aferem o fluxo de carbono ensinaram algumas importantes lições, que foram citadas por Ometto et al. (2005):

- Fluxos de CO<sub>2</sub> atmosféricos apresentaram variabilidade sazonal;
- A distribuição da energia de superfície e a evapotranspiração estão frequentemente ligadas à variabilidade do fluxo de CO<sub>2</sub>;
- As diferenças estruturais entre as florestas tropicais e as fisionomias do Cerrado (savana), ou pastagens, foram confirmadas pelos fluxos medidos;
- As vegetações suscetíveis a alagamentos apresentam fluxos diferentes das áreas permanentemente secas. A contribuição da zona úmida pode estar relacionada ao estoque de carbono de toda a bacia e depende da variabilidade do pulso de inundação;
- Características específicas da área (por exemplo, geomorfologia, distúrbios passados) alteram a medida do fluxo de CO<sub>2</sub>; e
- A combinação de acumulação anual de fluxos de CO<sub>2</sub> com medidas biométricas pode ajudar a inferir o papel de sumidouro ou fonte de carbono de uma vegetação, independentemente do seu comportamento transitório diário.

### **2.1.1 Projeto LBA**

O Experimento de Grande Escala da Biosfera - Atmosfera na Amazônia (LBA) é um projeto científico dirigido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), no âmbito técnico. A coordenação alternou entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE e o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/INPA. O projeto conta ainda com parcerias de instituições internacionais da Europa e Estados Unidos, como por exemplo, a Nasa (*National Aeronautics and Space Administration* - órgão oficial de pesquisas espaciais dos Estados Unidos) (LBA, 2007).

O programa surgiu em decorrência da necessidade de compreender como a intensa alteração da cobertura florestal na Amazônia interfere nos processos biológicos,

químicos e físicos da região e a interação com o clima em escala regional e global. Dessa forma, apontando e dimensionando as consequências dessas alterações, o projeto busca formas de minimizar os impactos ao meio ambiente (LBA, 2007).

O programa LBA é multidisciplinar e de forma geral as atividades são divididas em sete componentes de pesquisa: clima físico; dinâmica do carbono; biogeoquímica; química atmosférica; hidrologia de superfície e química da água; mudanças de uso e cobertura da terra; e as dimensões humanas das mudanças ambientais na Amazônia (LUIZÃO, 2014).

As atividades do projeto iniciaram-se em 1998 e têm produzido inúmeras publicações científicas, agregando importantes avanços no entendimento da dinâmica do ambiente amazônico tanto em áreas naturais quanto em áreas alteradas. Em relação ao fluxo de carbono na biomassa florestal, os estudos não observaram um padrão de assimilação de carbono, as taxas variaram bastante nos diferentes pontos de medição. Mesmo com todos os estudos elaborados com base na rede de torre de fluxos e parcelas de inventário florestal, até o momento não foi possível concluir se a região é uma fonte ou um sumidouro de carbono e quanto esse comportamento pode variar conforme a condição climática e a intensidade do desmatamento das áreas florestadas. Por esse motivo, isso se tornou uma questão central para os próximos estudos dentro do projeto LBA (OMETTO et al., 2005).

O projeto ainda apresenta grandes gargalos de informações, como o conhecimento sobre o efeito da topografia local no fluxo de carbono e o funcionamento do ciclo do carbono em regiões inundáveis, além da pouca representatividade das torres instaladas. Inclusive o projeto recomenda que medidas e modelos do balanço de carbono sejam aprimorados (LBA, 2007).

Em síntese, o conjunto de torres micrometeorológicas (Brasil-Flux) tem possibilitado o entendimento sobre os mecanismos que regem a ciclagem de carbono e o funcionamento do metabolismo florestal na Amazônia, e as respostas as perturbações climáticas, como *El Niño* e *La Niña*. Pesquisas com um período mais longo permitirão aumentar a compreensão da resposta à variabilidade interanual, sobretudo se integrada com outros tipos de dados (sensoriamento remoto e biometria em escala de parcela) e proporcionarão um melhor entendimento sobre as mudanças climáticas (SALESKA et al., 2009).

## 2.2 Comportamento Espectral da Vegetação

A vegetação intercepta a radiação incidente emitida diretamente do Sol ou da radiação difusa espalhada dos estratos superiores de folhas. A energia eletromagnética irá interagir com as folhas em função dos pigmentos fotossintetizantes, da água e da organização dos espaços intercelulares das folhas (JENSEN, 2011).

A energia radiante absorvida pelos pigmentos fotossintéticos presentes nas células fotossintetizantes é utilizada para converter CO<sub>2</sub> e água em carboidratos e outras moléculas orgânicas ricas em energia. Para otimizar a troca de gases entre os espaços aéreos intrafoliares e o meio ambiente e minimizar a perda de água; os tecidos foliares evoluíram para minúsculas estruturas porosas denominadas estômatos. Esses localizam-se nas superfícies foliares, especialmente na epiderme inferior, e sua distribuição e quantidade dependem da espécie e das condições ambientais (MAJEROWICZ, 2004).

Os pigmentos fotossintéticos absorvem a radiação solar em diferentes comprimentos de onda na faixa compreendida do espectro da luz visível (0,4 a 0,76  $\mu\text{m}$ ), o que confere uma utilização diferenciada do espectro de emissão solar. Os pigmentos estão localizados nos cloroplastos e as principais classes são: clorofilas, carotenoides e as ficobilinas (VIEIRA et al., 2010).

A clorofila *a* e a clorofila *b* são os mais importantes pigmentos vegetais absorvedores da luz azul e vermelha, somente as clorofilas absorvem na região do vermelho: a clorofila *a* nos comprimentos de onda 0,43 e 0,66  $\mu\text{m}$ , e a clorofila *b* nos comprimentos de onda 0,45 e 0,65  $\mu\text{m}$ . A maioria das plantas é transparente na região verde (0,54  $\mu\text{m}$ ). Os carotenoides são o segundo maior grupo de pigmentos, apresentam cor alaranjada ou amarela. Além da absorção de luz, os carotenoides protegem as clorofilas contra a foto-oxidação em casos de excesso de luz. A maioria das plantas é moderadamente transparente na região verde (0,54  $\mu\text{m}$ ). Dessa maneira, na região do visível são os pigmentos que irão determinar a forma de absorção da luz (VIEIRA et al., 2010).

Na região do infravermelho próximo (0,76 - 1,2  $\mu\text{m}$ ) grande parte da energia é refletida e ocorre considerável espalhamento interno da radiação na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região. A estrutura dos tecidos foliares influencia na quantidade de energia refletida, nesse sentido, o arranjo mais lacunoso proporciona um

maior espalhamento interno da radiação incidente e dos valores dos fatores de reflectância (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Em se tratando da região do infravermelho médio (1,2 -3,2  $\mu\text{m}$ ), a reflectância da folha é afetada pelo teor de água. A água absorve a maior parcela da radiação incidente na região espectral compreendida entre 1,3 a 2  $\mu\text{m}$ . Observam-se picos de absorção de água nas regiões de 1,1  $\mu\text{m}$ , 1,45  $\mu\text{m}$ , 1,95  $\mu\text{m}$  e 2,7  $\mu\text{m}$ . O sensoriamento remoto terá como alvo na maior parte das análises, o dossel da vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Um dossel é constituído, além das folhas, por galhos, frutos e flores. As características da absorção dos dosséis vegetais conjuntamente com outros dados do sensoriamento remoto podem fornecer informações sobre estresse, produtividade e outras variáveis hídricas da vegetação. Para o estudo do dossel, desenvolveu-se o Índice de Área Foliar (IAF), que avalia a quantidade de área de folha por área no terreno (adimensional). O índice apresenta uma relação com a reflectância do dossel, em geral com o aumento do valor IAF de um dossel, espera-se que a sua reflectância seja menor na região do visível e maior no infravermelho próximo. Esse comportamento não é linear, existe o ponto de saturação em que não será mais observado alterações significativas nos valores de reflectância do dossel. Os pontos de saturação representam uma limitação para a utilização das técnicas de sensoriamento remoto (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007, JENSEN, 2011).

Uma parte da radiação solar incide sobre o dossel diretamente sem interferência da atmosfera, sendo denominada fluxo direto, outra fração é absorvida ou espalhada pela atmosfera na direção descendente, por isso denominada fluxo difuso. As condições atmosféricas, especialmente aerossóis e vapor d'água, são os fatores que determinam a parcela do fluxo difuso, variando conforme o comprimento de onda, sendo maior na região do visível (0,40 e 0,78  $\mu\text{m}$ ) do que na região do infravermelho (0,80 a 2,60  $\mu\text{m}$ ) (PONZONI, 2001).

O fluxo radiante que incide sobre a vegetação pode sofrer espalhamento e absorção. O processo de espalhamento pode ser caracterizado em dois subprocessos: reflectância e transmitância através da folha. O comportamento do fluxo radiante incidente é dependente de suas características (comprimento de onda, ângulo de incidência e polarização) e das características físicas químicas dos elementos que compõe o dossel (PONZONI, 2001).

A interação da energia solar incidente com o dossel e o consequente movimento em direção ao sensor, depende do IAF, da densidade e orientação da vegetação. Dessa forma, o sensor recebe vários tipos de fluxos: - espalhamento único por um elemento da vegetação; espalhamento múltiplo por vários elementos da vegetação sem ter atingido o solo; fluxo refletido pelo solo sem ter sido interceptado por qualquer elemento (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

### **2.3 Índices de Vegetação**

Os índices de vegetação (IVs) são transformações espectrais de duas ou mais bandas, por meio da matemática de bandas, desenvolvidos para realçar as características da vegetação e permitir uma confiável comparação espacial e temporal da atividade fotossintética terrestre e das variações dos parâmetros estruturais, fenológicos e biofísicos da vegetação (HUETE et al., 2002).

O comportamento espectral da vegetação, em particular nas regiões do visível e do infravermelho próximo, permitiu o desenvolvimento de diversos índices de vegetação. O aumento da densidade da cobertura vegetal eleva a reflectância do infravermelho próximo devido ao espalhamento múltiplo da radiação nos diferentes estratos de folhas do dossel. Em oposição a isso, na região do visível a reflectância será menor em decorrência da maior quantidade de pigmentos fotossintetizantes. Em resumo, a reflectância na faixa do vermelho apresenta uma relação inversa não-linear com a biomassa verde, em oposição a isso, a reflectância no infravermelho próximo exhibe uma relação igualmente não linear e direta (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2011).

Os índices de vegetação servem como indicadores do crescimento e do vigor da vegetação verde e estão relacionados com vários parâmetros biofísicos, incluindo o IAF, teor de biomassa, porcentagem de cobertura do solo e atividade fotossintética. Além das características de reflectância da vegetação, os índices de vegetação são dependentes das variações do solo, atmosfera, calibração dos instrumentos e ângulos solar e de visada (PONZONI, 2001).

É desejável que os índices de vegetação atendam aos seguintes critérios: 1) maximizar, de forma linear, a sensibilidade aos parâmetros biofísicos das plantas; 2)

uniformizar efeitos externos, como por exemplo, ângulos solar e de visada e as interferências atmosféricas, possibilitando comparações ao longo dos anos; 3) uniformizar efeitos internos, tais como variações no sub-bosque e substrato abaixo do dossel, topografia e solos; e 4) ter correspondência com alguma variável biofísica mensurável com a finalidade de validar o índice com os dados de campo, como exemplo, a biomassa ou IAF (JENSEN, 2011).

### 2.3.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) foi proposto por Rouse et al. (1973) analisando imagens do LANDSAT MSS. É definido pela diferença do infravermelho próximo e a banda do vermelho dividida pela sua soma (Equação 1), esse tem sido o mais utilizado nos estudos de vegetação global.

$$NDVI = \frac{IVP-V}{IVP+V} \quad (1)$$

onde, IVP = reflectância no infravermelho próximo;  
V = reflectância no vermelho.

Assim como os outros índices de vegetação, o NDVI não é uma qualidade física intrínseca da vegetação, sendo resultado de certas propriedades físicas do dossel vegetativo, principalmente o índice de área foliar, a cobertura de vegetação e a quantidade de biomassa. Pode-se listar algumas limitações dos índices de vegetação (CARLSON; RIPLEY, 1997):

- As condições atmosféricas e a presença de aerossóis são fatores que alteram os valores das medições do NDVI na superfície, mais próximo do real, e obtidos por meio de imagens de satélite;
- A sensibilidade do NDVI ao IAF torna-se cada vez mais fraca quando o aumento do IAF vai além de um valor limiar, que normalmente está entre 2 e 3;
- As variações no brilho do solo podem produzir grandes variações no NDVI de uma imagem para outra (LIU; HUETE, 1995); e



- Huete et al. (1997) destacaram que diversos outros estudos mostraram que o índice satura sobre áreas densamente vegetativas, onde o NDVI não responde às variações na biomassa verde. Isso foi atribuído à alta sensibilidade do NDVI à banda de absorção vermelha (clorofila), que também se saturava rapidamente.

### 2.3.2 Índices de Vegetação Melhorado - EVI e EVI2

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI- *Enhanced Vegetation Index*) foi desenvolvido por Huete et al. (2002) para uso com dados do sensor MODIS com o objetivo de otimizar o sinal de vegetação mediante a melhora da sensibilidade em regiões de alta biomassa e do aperfeiçoamento do monitoramento da vegetação por meio da dissociação do sinal do fundo do dossel e da redução das influências da atmosfera (Equação 2) (HUETE et al., 2002).

$$EVI = G \frac{IVP - V}{IVP + C_1 V - C_2 A + L} \quad (2)$$

onde, IVP = reflectância no infravermelho próximo; V = reflectância no infravermelho no vermelho; A = reflectância no azul; G = fator de ganho; C<sub>1</sub> = coeficiente de ajustamento dos efeitos atmosféricos na banda do vermelho; C<sub>2</sub> = coeficiente de ajustamento dos efeitos atmosféricos na banda do azul; L = fator de ajustamento do solo.

Segundo Jiang et al. (2007), a banda do azul no EVI não fornece informações biofísicas adicionais sobre as propriedades da vegetação, mas sim visa reduzir o ruído e as incertezas associadas a aerossóis atmosféricos altamente variáveis. Por outro lado, Ginciene e Bitencourt (2011) citaram que essa banda é de suma importância para avaliar o sub-bosque da floresta. O comprimento de onda do vermelho é intensamente utilizado pelo dossel por ser mais fotossinteticamente ativo. O sub-bosque recebe uma mínima porção do vermelho e passa a utilizar uma proporção maior do azul para a realização da fotossíntese, assim espera-se que a utilização dessa banda capte melhor o comportamento desse estrato vegetal.

O EVI é frequentemente apontado como uma opção ao emprego do NDVI porque é menos sensível à saturação em regiões de alta biomassa, por outro lado, requer informações sobre a reflectância no comprimento de onda na faixa do azul, que não está

disponível em alguns satélites, limitando o uso do índice. Como alternativa, desenvolveu-se o EVI de duas bandas (EVI2) que não requer a reflectância da banda azul. Esse foi desenvolvido aproveitando as propriedades autocorrelativas dos espectros de reflectância superficial entre os comprimentos de onda vermelho e azul (Equação 3) (JIANG et al. 2008):

$$EVI2 = 2,5 \frac{(IVP-V)}{IVP+2,4V+1} \quad (3)$$

Embora o EVI2 use a mesma informação que o NDVI, o peso adicional na reflectância vermelha no denominador permite que EVI2 seja menos sensível ao escurecimento do solo (ROCHA; SHAVER, 2009).

### 2.3.3 Índice de sequestro florestal de carbono - CO<sub>2</sub>flux

O CO<sub>2</sub>flux é um índice que visa estimar a taxa fotossintética que está estritamente relacionada com a absorção de carbono pela vegetação. Esse índice foi desenvolvido por Rahman et al. (2000) e nomeado por Baptista (2003). O índice consiste na multiplicação do NDVI pelo PRI (Índice de Reflectância Fotoquímica - *Photosynthetic Reflectance Index*).

O índice PRI foi desenvolvido por Gamon, Peñuelas e Field (1992) estudando o comportamento espectral em laboratório de plantas de girassol. Este índice tem como base a relação do estado de oxidação dos pigmentos do ciclo xantofila com a eficiência da fotossíntese na conversão de energia. Esses pigmentos são responsáveis pela regulação da energia de luz absorvida, protegendo o sistema fotossintético do excesso de luz dentro da folha, além disso podem ser considerados um indicador óptico, relacionando a reflectância espectral com a alteração da atividade fotossintética.

O PRI é mais eficiente do que os índices convencionais de vegetação para monitorar as variações diárias e sazonais das taxas fotossintéticas do dossel. Embora o NDVI tenha boa correlação com diversas propriedades da vegetação, como a quantidade de biomassa, a capacidade fotossintética do dossel e o índice de área foliar, em determinadas situações ele não consegue capturar os processos fisiológicos dinâmicos, nas esferas temporal e espectral (GAMON et al., 1990, GAMON; PEÑUELAS; FIELD,

1992). Assim, observando a utilização mais adequada desses índices para avaliar a dinâmica da vegetação, é interessante analisá-los conjuntamente, pois as informações de cada índice se complementam.

O estudo Gamon, Peñuelas e Field (1992) identificou que o PRI não funcionou bem em copas de girassol sob estresse, onde os distúrbios severos do meio-dia e as mudanças diurnas na iluminação do solo predominaram sobre as características da dinâmica da reflectância no visível.

Coops et al. (2010) citaram que a proporção da copa que está sombreada ou iluminada exerce importante influência na eficiência do uso da luz (LUE – *Light Use Efficiency*). No entanto, a fração de folhas que estão iluminadas depende da estrutura da vegetação e da posição relativa do sensor em relação ao dossel e ao Sol. Se a estrutura da vegetação não é bem conhecida, será difícil definir se as alterações no PRI são devidas a uma posição diferente do sensor ou em decorrência de mudanças reais no LUE.

O PRI relaciona a feição de resposta do pigmento da xantofila (0,531  $\mu\text{m}$ ) com o pico de reflectância no verde (0,570  $\mu\text{m}$ ), que é empregado para minimizar as complicações associadas às alterações diurnas do ângulo do sol (GAMON; PEÑUELAS; FIELD, 1992).

Coops et al. (2010) ressaltaram que o MODIS não foi idealizado para estimar a eficiência do uso da luz por meio do índice PRI, pois além de não ter banda em 0,570  $\mu\text{m}$ , a banda 11, que contempla o comprimento de onda em 0,531  $\mu\text{m}$ , possui a resolução espacial mais baixa do sensor. Desse modo, os autores utilizaram outras faixas do espectro para o cálculo e concluíram que o PRI pode ser determinado utilizando outras regiões do espectro, dependendo da estrutura e composição da vegetação. Drolet et al. (2005) testaram as bandas 1 (0,620–0,670  $\mu\text{m}$ ), 4 (0,545–0,565  $\mu\text{m}$ ), 12 (0,546–0,556  $\mu\text{m}$ ) e 13 (0,662–0,672  $\mu\text{m}$ ) e encontraram uma forte correlação para a banda 13. Goerner et al. (2011) também investigaram essa hipótese na determinação do PRI, utilizando as bandas 1, 4, 10 e 12 do MODIS em substituição da banda centrada em 0,570  $\mu\text{m}$  e os melhores resultados obtidos foram com as bandas 1, 4 e 12, variando conforme as características da vegetação.

A fórmula do PRI (Equação 4) é semelhante em estrutura ao NDVI, medindo também por diferença normalizada, a relação entre a faixa do espectro na região do azul e o pico de reflectância da vegetação na região do verde (BAPTISTA; MUNHOZ, 2009). Os valores do índice variam entre -1 e 1, quanto mais próximo de zero for o PRI,

maior a eficiência na utilização da luz pela fotossíntese e os valores comuns para vegetação sadia ficam entre -0,2 e 0,2 (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997).

$$PRI = \frac{A - V_e}{A + V_e} \quad (4)$$

onde,  $V_e$  = reflectância no verde;  $A$  = reflectância no azul

Essa equação pode apresentar resultados negativos, desse modo é necessário realizar o reescalonamento desses valores, essa operação é denominada de sPRI (Equação 5) (RAHMAN et al., 2001).

$$sPRI = (PRI + 1)/2 \quad (5)$$

Por fim, o cálculo do  $CO_2$ flux exige apenas a multiplicação dos dados do NDVI e sPRI, assim pode-se estimar a taxa relativa fotossintética (RAHMAN et al., 2001).

## 2.4 Sensor MODIS

O sensor MODIS foi desenvolvido pelo programa *Earth Observing System* (EOS) liderado pela NASA, por isso também é denominado de EOS e está presente a bordo de duas plataformas, TERRA e AQUA. O satélite TERRA foi lançado em 1999 e o horário de passagem é por volta das 10h30 no equador. Após três anos foi lançado o satélite AQUA que tem como objetivo contribuir para aumentar o conhecimento do ciclo da água na terra, o horário de passagem pelo equador é 13h30 (SOARES; BATISTA; SHIMABUKURO, 2007). Essa diferença entre os horários de passagem dos dois satélites é interessante para avaliar as diferenças nas reflectâncias dos alvos.

O sensor possui 36 bandas com resolução espacial de 250 m (bandas 1 e 2), 500 m (bandas 3 a 7) e 1000 metros (bandas 8 a 36). A alta resolução temporal é certamente o grande diferencial desse sensor, o período de revisita varia de 1 a 2 dias dependendo da região do globo. Ademais, são disponibilizados gratuitamente diversos produtos, tais como séries dos índices do NDVI e EVI (JUSTICE et al., 2002).

O sensor MODIS foi idealizado como um aperfeiçoamento do monitoramento realizado pelo sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo do satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (BORGES, 2014).

Segundo Justice et al. (2002), os dados do sensor são divididos em cinco níveis (0 a 4) de acordo com grau de processamento estabelecido:

- Nível 0 – é a imagem sem nenhum tipo de tratamento, em seu estado bruto, esse produto não está disponível aos usuários;
- Nível 1 - esse é classificado em dois subníveis, 1A e 1B. Nível 1A - contém todas as 36 bandas do MODIS, utilizadas como base de entrada para geolocalização, calibração e processamento. Os dados apresentam indicadores de qualidade para indicar a perda de dados ou pixels ruins; Nível 1B: os produtos contêm os dados de calibração e geolocalização para as bandas geradas pelo nível 1A. O BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* - Reflectância Bidirecional) pode ser determinado para as bandas reflexivas do espectro eletromagnético (1-19 e 26) a partir da informação da irradiação solar e da geometria de iluminação do alvo. Em acréscimo, são fornecidas informações com estimativas de qualidade, de erro e dados de calibração.
- Nível 2 - são derivados da calibração das radiâncias dos produtos MODIS anteriores. De um conjunto desses produtos, são elaborados os produtos 2G que são reorganizados e armazenados em uma grade de referência baseada na Terra;
- Nível 3 - são espacialmente reamostrados e temporariamente compostos para produzir uma estimativa das variáveis geofísicas para cada local da grade de localização.
- Nível 4 - esse nível realiza a modelagem dos dados MODIS para estimar as variáveis geofísicas.

O sensor MODIS disponibiliza inúmeros produtos pré-processados, como imagens georreferenciadas e com correções atmosféricas, índices de vegetação, indicadores de qualidade dos pixels, etc. Esses produtos facilitam a etapa de processamento e viabiliza a sua utilização por usuários com perfis diferentes de conhecimento (BORGES, 2014). A Tabela 1 apresenta alguns produtos de superfície terrestres gerados pelo sensor MODIS.

**Tabela 1** - Alguns produtos disponíveis do sensor MODIS.

<b>PRODUTOS</b>	<b>Especificações</b>
<b>Relacionados ao Balanço de Energia</b>	
MOD021KM	Radiância de superfície – Nível 1
MOD09	Reflectância de superfície.
MOD11	Temperatura da superfície da Terra e emissividade
MOD43	BRDF/albedo
MOD10 e 29	Cobertura de neve e extensão de gelo na superfície do mar
<b>Relacionados à Vegetação</b>	
MOD13	Grades de índices de vegetação (NDVI e EVI)
MOD15	<i>Leaf Area Index (LAI) e Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FPAR)</i>
MOD17	Fotossíntese e produtividade primária
<b>Relacionados à Cobertura Terrestre</b>	
MOD12	Cobertura da terra e mudança na cobertura da terra
MOD14	Anomalias termais, fogo e queima de biomassa
MOD44	Conversão da cobertura vegetal

Fonte: Latorre et al. (2003).

O MOD021KM são cenas diárias individuais do produto nível 1, pode ser obtida de qualquer parte da terra, todos os dias. Esses arquivos estão na projeção geográfica e possuem resolução espacial de 1 km (NASA, 2017).

O MOD09 contempla produtos de reflectância da superfície das bandas de 1 a 7, com diferentes resoluções espaciais. Esses produtos possuem informações que implicam na qualidade da imagem, tais como: presença de nuvens, presença de aerossol, informações de vapor d'água, integridade da estimativa da reflectância de correção (LATORRE et al., 2003).

O MOD13 apresenta os produtos relativos aos índices de vegetação, NDVI e EVI, produzidos com 1 km e 500 m de resolução e composições para o período de 16 dias. O MOD15 contém o IAF e a Fração da Radiação Absorvida pela Vegetação Fotossinteticamente Ativa (FPAR), fornecidos diariamente ou na composição de oito dias. O IAF compreende a estrutura do dossel da vegetação, enquanto o FPAR está relacionado a taxa de energia disponível para a fotossíntese (LATORRE et al., 2003).

O MOD17 consiste na medição de oito dias de fotossíntese líquida (*Net Photosynthesis*) e produtividade primária líquida (NPP - *Net Primary Production*) e a produção primária líquida anual. Esses produtos estão relacionados com o crescimento da vegetação e produtividade, conseqüentemente são bastante utilizados com o objetivo de realizar estimativas do fluxo de carbono da vegetação (LATORRE et al., 2003).

As imagens do sensor MODIS são disponibilizadas em recortes espaciais que cobrem uma área geográfica de 10 x 10 graus de latitude/longitude. O território brasileiro é dividido em 17 recortes (ESQUERDO; ANTUNES; ANDRADE, 2011).

Borges (2014) destacou que a moderada resolução espacial é compensada pela elevada resolução temporal, viabilizando o monitoramento da paisagem de forma contínua e em escala regional e reduzindo custos operacionais e demanda de tempo. É importante ressaltar que o conceito de resolução espacial é relativo, dependendo do que consideramos como referencial para comparação.

Oliveira (2012), analisando a utilização do sensor MODIS para estimar fluxos energéticos e a evapotranspiração da Floresta Amazônica, concluiu que a baixa resolução espacial pode ter causado erros na estimativa dos dados em relação ao uso do sensor ASTER. Apesar disso, o relativo alto número de bandas e alta resolução radiométrica e temporal viabilizam a utilização do MODIS para essas finalidades.

A fim de garantir a acurácia das séries temporais, o MODIS foi projetado preocupando-se com a precisão do georreferenciamento das imagens. Os dados de localização da Terra MODIS possui precisão sub-pixel, aproximando-se de 50 m no nadir (WOLFE et al., 2002).

Justice et al. (2002) destacaram os produtos que avaliam a qualidade da imagem como outro diferencial do sensor MODIS. Os metadados dos produtos indicam a qualidade dos dados e avisam da presença de cobertura de nuvens. Dentre os produtos prontos para o uso (*ready-to-use*) possui o produto “*pixel reliability*” que permitem avaliar a confiabilidade dos dados disponíveis (BORGES, 2014).

As imagens diárias disponibilizadas pelo sensor, em geral, são preteridas pelos produtos com as composições dos melhores pixels das imagens diárias ou dos índices de vegetação (ESQUERDO; COUTINHO; ANTUNES, 2013). Duveiller, Lozano, e Cescatti (2015), estudando as imagens MODIS para analisar áreas de cultivo, concluíram que a utilização das séries diárias de imagens do MODIS (que tem sido pouco exploradas) podem fornecer mais informações que as composições de imagens.

Borges (2014) enfatizou que o pequeno intervalo de revisita do sensor MODIS aumenta a probabilidade de obter imagens com ausência de nuvens. Esse fator é importante para áreas com alta pluviosidade anual, como as florestas tropicais.

## 2.5 Estado da Arte sobre Balanço Energético da Vegetação

Diversos termos são abordados pela literatura ao estudar o balanço energético da vegetação, a Tabela 2 apresenta alguns dos termos mais utilizados. A grande maioria dos estudos com imagens de satélite utilizam as torres micrometeorológicas como forma de validar a modelagem dos dados desses índices.

**Tabela 2** - Termos relacionados ao Balanço Energético da Vegetação.

<b>Sigla</b>	<b>Termo</b>
<b>GPP</b>	<i>Gross Primary Productivity</i> - Produção Primária bruta
<b>LUE</b>	<i>Light Use Efficiency</i> - Eficiência no Uso da Luz
<b>NEE</b>	<i>Net Ecosystem Exchange</i> – Troca Líquida de (Carbono) do Ecossistema
<b>PAR</b>	<i>Photosynthetically Active Radiation</i> - Radiação Fotossinteticamente Ativa
<b>faPAR</b>	<i>The fraction of PAR that is Actually Absorbed by the <u>Vegetation</u></i> – Fração do “PAR” que efetivamente é absorvida pela vegetação
<b>NPP</b>	<i>Net primary production</i> – Produção Primária Líquida
<b>GPP</b>	<i>Gross Primary Production</i> – Produção Primária Total
<b>GCE</b>	<i>Gross Carbon Exchange</i> - Troca de Carbono Total

Apesar das limitações, de baixa resolução espacial e ausência do comprimento de onda de 0,570,  $\mu\text{m}$  para a utilização do sensor MODIS no cálculo do PRI, a literatura possui diversos estudos que mostram a utilização desse índice obtido nas imagens MODIS no estudo do ciclo do carbono. As principais características que motivam a utilização são: fácil acesso as imagens, imagens diárias e alternativas de bandas para o cálculo do PRI.

No entanto, trabalhos que relacionam os índices de vegetação (NDVI, EVI e EVI2) com o PRI, como por exemplo pelo método do CO<sub>2</sub>flux, para estimar o fluxo de carbono ainda são escassos.

O estudo de Rahman et al. (2001), no qual foi proposta a metodologia para o cálculo do CO<sub>2</sub>flux, utilizou imagens do sensor hiperespectral AVIRIS (*Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer*) para o ano de 1994 para seis diferentes regiões da floresta boreal do Canadá. Primeiramente, calculou-se a correlação do NDVI e do PRI separadamente com o fluxo de carbono obtido das torres micrometeorológicas, foi encontrado uma correlação positiva com coeficiente de determinação respectivamente de 0,57 e 0,4, após isso, calculou-se a relação do índice do CO<sub>2</sub>flux com o fluxo de



carbono, também foi obtido uma correlação positiva com coeficiente de determinação de 0,78, maior que o NDVI e PRI.

Pedroza da Silva (2014) aplicou a modelagem do CO<sub>2</sub>flux em diferentes paisagens na Amazônia Brasileira, utilizando 21 imagens do sensor hiperespectral Hyperion com resolução espacial de 30 metros e os dados das torres micrometeorológicas. Concluiu-se que, apesar das imagens ruidosas do Hyperion é possível estimar o sequestro de carbono por meio do CO<sub>2</sub>flux utilizando os índices NDVI, EVI e EVI2.

Santos (2017) desenvolveu o estudo do CO<sub>2</sub>flux para áreas de Caatinga preservada e em estado de regeneração. Nesse trabalho, o CO<sub>2</sub>flux foi determinado apenas com o NDVI e o PRI a partir de 22 cenas do sensor Landsat-8. Os resultados da análise apresentaram um bom ajuste do modelo do CO<sub>2</sub>flux com observação de fluxo de carbono dos sítios meteorológicos de  $R^2 = 0,82$ , e conseguiram captar as mudanças sazonais do fluxo de carbono para a região.

Contudo, a maioria das pesquisas concentra-se em relacionar o PRI com a LUE. Segundo Drolet et al. (2005), a maneira mais simples de estimar a LUE é utilizando os dados do fluxo de carbono dos sítios micrometeorológicos. O cálculo da LUE consiste na divisão do fluxo de carbono pela faPAR. Os autores ressaltaram que essa definição pode variar conforme a base científica de cada trabalho.

Dessa forma, esse estudo empregou o índice PRI para avaliar a eficiência do uso da luz pela fotossíntese de uma floresta boreal canadense para um período de três anos (2001 a 2003). O PRI calculado a partir de bandas do sensor MODIS foi relacionado com dados de campo de fluxo de carbono obtidos das torres. Foram utilizadas as imagens diárias para o cálculo do PRI, ao total de 51 cenas, que correspondem aos dias sem nuvens nesse período. Foram realizados diversos testes com diferentes bandas no cálculo do PRI para encontrar a melhor correlação (DROLET et al., 2005).

Esse estudo apresentou o diferencial de dividir o conjunto de dados em dois grupos considerando o ângulo de reflectância: retroespalhamento (*backscatter*) e espalhamento frontal (*forward scatter*). O trabalho descreve os critérios para distinguir cada uma dessas categorias. A melhor resposta foi obtida quando se calculou o PRI com a banda 13 em cenas *backscatter* que passaram por correção atmosférica do que para as reflectâncias da superfície ( $R^2 = 0,76$  e  $0,53$ , respectivamente), no entanto, isso não foi regra para todas as bandas utilizadas. Com relação aos valores isolados das reflectância

das bandas 11, 12 e 13, verificou-se que esses diminuem com o aumento da LUE, sugerindo que pode ter ocorrido uma redução no teor da clorofila no dossel ou um aumento da visibilidade do material não fotossintético (DROLET et al., 2005).

A pesquisa de Garbulsky et al. (2008) utilizou uma série temporal maior de 2001 a 2005 para desenvolver um modelo que pudesse estimar a eficiência do uso da radiação de uma floresta mediterrânea. Essa vegetação possui significativos períodos de baixa taxa fotossintética. Foram avaliados para compor a modelagem de absorção de carbono, os índices PRI, NDVI e EVI utilizando o produto MOD09A1 e a composição de oito dias da faPAR (MOD15A2). O modelo foi validado com os dados das torres que medem o fluxo de carbono.

Verificou-se nessa pesquisa de Garbulsky et al. (2008) que o PRI acompanhou a variação da eficiência do uso da radiação ao longo do período de estudo, apresentando significativas correlações lineares e exponenciais. Dessa forma, durante a maioria dos anos analisados, o PRI foi um bom reflexo das mudanças sazonais da magnitude da eficiência do uso da radiação. O mesmo resultado não foi obtido pelos outros índices, o NDVI obteve correlação quase nula e o EVI apresentou uma correlação moderada negativa.

Além disso, alguns estudos não restringiram os modelos aos índices espectrais e inseriram dados meteorológicos como variáveis, como por exemplo, a pesquisa de Goerner et al. (2011), que teve como objetivo estimar a LUE para diferentes tipos de floresta. Foram testados diversos modelos utilizando as seguintes variáveis de entrada: imagens diárias de reflectância (MOD/MYD21KM) para o cálculo do PRI, MOD15A2 (Índice de Área Foliar e FPAR), MOD17 (composição de oito dias da Produtividade Primária) e os dados meteorológicos. A validação dos modelos foi feita com os dados de campo obtidos pelas torres de medição micrometeorológica. Conclui-se que a modelagem utilizando o PRI foi melhor que outros modelos.

Esse trabalho separou os modelos com base no ângulo de visada do sensor e constatou que todos os modelos obtiveram melhor relação com a LUE para as observações próximas do nadir. Essa diferença é explicada porque, dependendo do ângulo de visada, o satélite pode detectar diferentes porções de copa de árvore e solo, resultando em variação da reflectância da superfície. Assim, florestas densamente vegetadas são menos afetadas pelo ângulo de visada. Outra justificativa pela qual os dados próximos do nadir podem ter uma melhor correspondência com dados de eficiência do uso da luz se deve ao menor efeito atmosférico em razão da maior

proximidade da superfície terrestre com o satélite em comparação aos outros ângulos de visada (GOERNER et al., 2011).

Segundo os autores, um dos intuitos para criação de um modelo para estimar a eficiência do uso da luz é que esse possa ser utilizado para outros locais que apresentem características ambientais semelhantes ao local para onde foi delineado originalmente. Assim aplicou-se um modelo criado com dados de uma floresta tropical para outra área com condições semelhantes, porém, os resultados não obtiveram boa correspondência com a LUE observada em campo (GOERNER et al., 2011).

Os produtos MODIS foram correlacionados com dados das torres micrometeorológicas em outros artigos. Tang et al. (2011) propuseram um modelo com diferentes produtos do sensor MODIS, incluindo o EVI, o índice de umidade (LWSI - *Land Surface Water Index*), a temperatura da superfície terrestre (LST - *Land Surface Temperature*) e Terra LST Noturno para estimar a troca líquida diária de carbono do ecossistema (NEE). Foi estudada uma área de floresta temperada decídua, durante o período de seis anos (2001 – 2006). O método obteve um ótimo desempenho com coeficiente de determinação de 0,857 e pôde capturar os padrões sazonais de NEE.

Yan et al. (2015) propuseram um modelo para estimar a troca líquida do carbono do ecossistema para uma área de pastagem natural do planalto tibetano. Foram utilizados, como variáveis do modelo, os índices NDVI, EVI e LWSI estimados por meio do produto MOD09A1 (composição de reflectância de oito dias de imagens) e algumas variáveis ambientais. O modelo foi calibrado com base nos dados das torres micrometeorológicas para o período de 2003 a 2007 e testado para outro local com vegetação com as mesmas características. Na etapa de calibração, o modelo teve uma ótima performance com  $R^2 = 0,9$ , na etapa seguinte, de validação, o resultado foi um pouco menor, porém ainda satisfatório ( $R^2 = 0,62$  e  $0,83$ , respectivamente para os anos de 2008 e 2009). O modelo foi menos preciso em anos de seca e para medições à noite, considerou-se que a umidade do solo é um fator que pode ser incorporado para melhorar o desempenho do modelo.

Potter et al. (2009) testaram o modelo CASA (*Carnegie-Ames-Stanford Approach*) baseado em observações por satélite do índice de vegetação EVI extraído do sensor MODIS para estimar os fluxos de carbono nos ecossistemas terrestres dos biomas da Amazônia e Cerrado no período 2000-2004. Outros dados foram utilizados para alimentar o modelo, como temperatura do ar e precipitação. As taxas de absorção de  $CO_2$  nas florestas amazônicas e na vegetação do Cerrado foram altas e os maiores

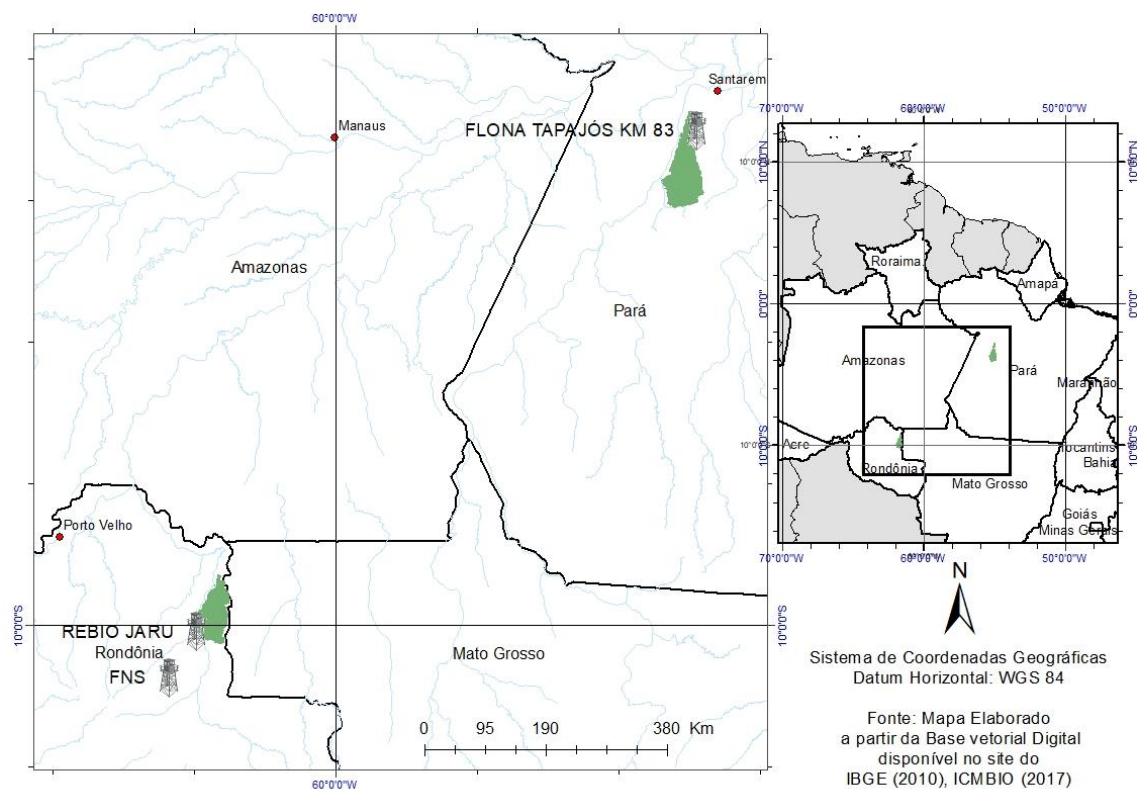
valores foram encontrados nas porções ocidentais dos estados do Acre e Rondônia e na parte norte do estado de Pará. Essas áreas não foram impactadas significativamente pelo evento *El Niño* de 2002-2003 em termos de ganhos anuais líquidos de carbono. As torres do projeto LBA foram utilizadas nesse trabalho para validar o modelo, que indicou potencial para estimar o fluxo de carbono sazonal com o produto EVI do MODIS.

Skinner, Wylie e Gilmanov (2011) correlacionaram os dados das estações micrometeorológicas com os valores semanais do NDVI obtidos por meio do sensor MODIS para duas pastagens na região central da Pensilvânia nos anos de 2006 a 2008. Quando utilizado sozinho, o NDVI foi pouco eficiente para prever a produção primária ( $R^2 = 0,38$ ). Para melhorar o modelo foram adicionadas as medidas da radiação fotossinteticamente ativa obtidas em campo. Dessa forma, o modelo obteve boas respostas, com valores de crescimento preditos variando apenas em média 3% dos valores reais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na região amazônica e contemplou três áreas onde estão localizados os sítios experimentais de coleta de dados do projeto LBA, por meio de torres micrometeorológicas. A Figura 1 mostra a localização das torres micrometeorológicas.



**Figura 1** - Localização das torres micrometeorológicas: FNS (RO), Rebio Jaru (RO) e Flona Tapajós (PA).

A definição das áreas objeto desse estudo levou em consideração principalmente a disponibilidade dos dados das torres, priorizando as regiões com diferentes características de cobertura vegetal: vegetação nativa preservada, área de manejo florestal madeireiro e área de pastagem (Tabela 3).

**Tabela 3** - Torres micrometeorológicas de medição do fluxo de CO<sub>2</sub> selecionadas.

Estado	Município	Local	Vegetação	Nome	Coordenadas Geográficas	
					Latitude	Longitude
Rondônia	Ouro Preto do Oeste	Fazenda Nossa Senhora Aparecida	Pastagem	FNS	-10.750	-62.367
	Ji-Paraná	Reserva Biológica do Jaru	Floresta Primária	Rebio	-10.083	-61.931
Pará	Santarém	Floresta Nacional do Tapajós	Floresta Manejada	Km83	-3.018	-54.971

Fonte: LBA, 2017.

O escritório local do Projeto LBA de Ji-Paraná (RO) disponibilizou os dados das torres de arquivos históricos referentes ao período de 2003 a 2010. Os dados da torre do Pará foram obtidos no *site* “[ameriflux.lbl.gov/sites/siteinfo](http://ameriflux.lbl.gov/sites/siteinfo)”. O objetivo inicial do projeto era analisar um período de 10 anos, contudo, os dados mais recentes não foram compilados para o público externo do projeto e os dados liberados possuem diversas lacunas de informações.

Oliveira e Fisch (2001) ressaltaram que os sítios observacionais do LBA devem ter áreas com tamanho suficiente para que cada tipo de cobertura vegetal possa desenvolver sua própria “Camada Limite Atmosférica”, assim as medições serão fidedignas ao tipo de vegetação estudada.

### 3.1.1 Reserva Biológica do Jaru

A Reserva Biológica (Rebio) do Jaru é uma unidade de conservação federal de proteção integral criada pelo Decreto 83.716 de 11 de julho de 1979, protegendo uma área de 353 mil hectares. A Rebio está localizada no leste do estado de Rondônia, abrangendo parte de seis municípios: Machadinho D’Oeste, Vale do Anari, Theobroma, Ouro Preto do Oeste, Vale do Paraíso e Ji-Paraná (ICMBIO, 2010).

A Reserva está inserida no Corredor de Conservação da Amazônia Meridional que contém partes intactas de vegetação do limite sul deste bioma, além das áreas de vegetação de transição com o bioma Cerrado. Este Corredor se estende desde o estado de Tocantins até Rondônia. A cobertura vegetal é marcada por ambientes florestais, com predominância da Floresta Ombrófila Submontana Densa ou Aberta, de acordo com

fatores de sítio que limitam ou proporcionam tais formações, como gradientes latitudinais e ripários (ICMBIO, 2010). Em relação à vegetação no entorno da torre micrometeorológica, essa é classificada como Floresta Ombrófila Aberta com Palmeiras. A altura média do dossel é de 35 m, com árvores que atingem até 45 m de altura e o sub-bosque é rico em palmeiras com altura média de 20 m e vegetação relativamente mais aberta. A estação micrometeorológica possui 61,5 metros de altura e foi instalada em 2004 (LBA, 2017) (Figura 2).

O estado de Rondônia apresenta um clima tipicamente tropical úmido, prevalecendo temperaturas elevadas durante todo o ano, entre 23° e 26°C, porém, com elevada amplitude térmica diária. Os meses mais chuvosos ocorrem entre novembro a março, período conhecido como inverno, e a estação mais seca denominada verão, ocorre nos meses de maio a setembro. Os meses de abril e outubro são considerados de transição entre as duas estações principais. Na região da Rebio, as médias anuais de precipitação oscilam entre 1700mm ao sul e 2400mm ao norte (ICMBIO, 2010).





**Figura 2** – A - Vista da floresta do sítio observacional do LBA na Reserva Biológica do Jaru. B - Detalhe da torre micrometeorológica. Autor: Jeison T. Alflen.

### 3.1.2 Fazenda Nossa Senhora

A fazenda de criação de gado conhecida por Fazenda Nossa Senhora Aparecida (FNS), situa-se cerca de 8 km a sudoeste do município de Ouro Preto do Oeste, na porção centro-leste do estado de Rondônia (RO). Esta área foi desflorestada pela primeira vez em 1977, utilizando-se o método da queima, e desde 1991 é composta por pastagem homogênea de gramínea perene (74%), com fragmentos de áreas de sucessão secundária (16%) e floresta ombrófila aberta (10%) A torre situa-se próxima da Rebio Jaru, assim possui as mesmas características de clima e consequentemente apresenta condições propícias para realizar comparações com a Reserva, como por exemplo, conhecer o efeito do desmatamento no microclima da região (OLIVEIRA; MORAIS, 2013; LBA, 2017) (Figura 3).





**Figura 3** - Sítio experimental Fazenda Nossa Senhora (RO).  
Fonte: França; Cortes (2017).

A torre do projeto LBA foi instalada no final de 1998, sendo construída em alumínio, com 8 m de altura e possui seção de 2,5 m x 1,5m (LBA, 2017).

### 3.1.3 Torre km 83 - Floresta Nacional do Tapajós

A torre km 83 está localizada na Floresta Nacional (Flona) do Tapajós, no estado do Pará, por volta de 70 km ao sul da cidade de Santarém. A Flona abrange parte dos municípios de Belterra, Aveiro, Rurópolis e Placas, possuindo uma área aproximada de 545.000 ha. A Floresta Nacional do Tapajós foi criada pelo Decreto 73.684 de 19 de fevereiro de 1974 (IBAMA, 2004).

A plataforma instrumental de 67 m de altura foi instalada em junho de 2000, aproximadamente 2 km a oeste da entrada do km 83 da Rodovia Cuiabá-Santarém (BR-163), e 14 km a leste da margem oriental do Rio Tapajós. A floresta faz fronteira com diversas áreas de pastagem. A área ao leste da torre sofreu um corte seletivo de madeiras como parte de um experimento em setembro de 2001, realizado pela empresa

CEMEX com o apoio técnico do Serviço Florestal Americano e da Fundação Floresta Tropical (FFT). A extração retirou apenas 5 % da biomassa vegetal, abrindo pequenas clareiras entre a mata (PINTO, 2003; GOULDEN et al., 2004). Segundo Rice et al. (2004), o corte seletivo não alterou o padrão sazonal de incremento de madeira para essa floresta e apresentou comportamento semelhante ao observado em uma floresta próxima intacta durante o mesmo período (Figura 4).

A região possui temperatura média anual de 25,5 °C, com máxima de 30,6 °C e mínima de 21,0 °C, com pequena variação térmica durante o ano. Medições de um período de 50 anos da estação de Belterra (20 km da Flona) mostrou a presença de um período sazonal seco, de janeiro a junho e outro chuvoso, de julho a dezembro, bem definidos, resultando em uma precipitação média anual de 1.820 mm (IBAMA, 2004; ESPÍRITO-SANTO et al., 2005; GONÇALVES; SANTOS, 2008).

A vegetação predominante é classificada como Floresta Ombrófila Densa ocupando 86,3% da área interna da unidade de conservação, caracterizando-se pela dominância de indivíduos arbóreos com altura média de dossel de 40 m e pela abundância de lianas lenhosas, palmeiras e epífitas. Variações no relevo local resultam na ocorrência de tipologias florestais diferenciadas, as quais se apresentam com dossel uniforme ou com árvores emergentes (IBAMA, 2004; GONÇALVES; SANTOS, 2008).





**Figura 4** – A - Vista do Sítio experimental Km 83 na Flona Tapajós (PA). B - Trilha em direção à torre micrometeorológica. Fonte: ICMBIO, 2017.

### 3.2 Processamento de Imagens do Sensor MODIS

Foram utilizados dados orbitais MODIS/TERRA referentes a dois produtos disponibilizados diariamente, MOD021KM – *Level 1B Calibrated Radiances* – 1 km e MOD09 - *Terra Surface Reflectance*. A seleção das datas das imagens utilizadas no estudo considerou a disponibilidade de dados de superfície do LBA e a ausência de nebulosidade ou nuvens no pixel referente as torres e entorno.

O produto MOD021KM é classificado como nível 1B e está disponível em formato de radiância e reflectância. O produto contém as radiações calibradas para as 36 bandas espectrais com uma resolução espacial de 1 km. O produto MOD09 pertence ao nível 2, os dados diferenciam-se do primeiro por serem corrigidos dos efeitos atmosféricos. O processamento de ambos produtos se resumiu em realizar a reprojeção das imagens para projeção geográfica e Datum WGS 84 por meio da ferramenta *Georeference MODIS* do software ENVI.

Os produtos MODIS do satélite Terra foram obtidos do *site* da NASA *Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC)* (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search/>). O *site* permite visualizar as imagens e selecionar apenas aquelas que estão em conformidade com o padrão desejado de cobertura de nuvens.

Os índices de vegetação podem ser calculados utilizando a ferramenta *Band Math* do ENVI, no entanto, como cada imagem tinha apenas um pixel objeto de estudo, correspondente às coordenadas das torres micrometeorológicas, optou-se por extrair os valores de reflectância das bandas de interesse do pixel de cada imagem e os cálculos dos índices foram realizados no Excel.

O sequestro de carbono foi estimado a partir da modelagem do CO<sub>2</sub>flux e dos índices isolados (sPri, NDVI, EVI e EVI2). A modelagem do CO<sub>2</sub>flux integra dois índices de vegetação, em sua essência o PRI e o NDVI. Nesse trabalho, além do NDVI, foram utilizados o EVI e EVI2.

Pedroza da Silva (2014), em seu estudo de sequestro de carbono na Região Amazônica, testou substituir o NDVI no cálculo do CO<sub>2</sub>flux pelos índices de vegetação EVI e EVI2. Nesse trabalho, o NDVI obteve o melhor ajuste com o maior coeficiente de determinação. Contudo, os outros índices também obtiveram valores satisfatórios de coeficientes de determinação.

Apesar disso, no presente estudo optou-se por aferir qual desses índices é mais adequado para a determinação do CO<sub>2</sub>flux, visto que nesta pesquisa as imagens são provenientes do sensor MODIS que, diferentemente do trabalho de Pedroza da Silva (2014), utilizou o sensor Hyperion, que é hiperespectral. Ademais, neste caso, o teste do EVI e do EVI2 como variável para o CO<sub>2</sub>flux é interessante, pois esses índices foram idealizados por Huete et al. (1997) e por Jiang et al. (2008), respectivamente, considerando a resolução espectral do MODIS.

O MODIS apresenta bandas relacionadas aos índices de vegetação com diferentes resoluções espaciais, como pode ser visto na Tabela 4.

**Tabela 4** – Especificações das Bandas 1 a 16 do sensor MODIS.

<b>Uso Primário</b>	<b>Resolução Espacial (m)</b>	<b>Banda</b>	<b>Largura de Banda (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>Superfície terrestre/nuvem</b>	250	1	0,620-0,670
		2	0,841-0,875
		3	0,459-0,479
<b>Propriedades da superfície/nuvem</b>	500	4	0,545-0,565
		5	1,230-1,250
		6	1,628-1,652
		7	2,105-2,155
		8	0,405-0,420
		9	0,438-0,448
		10	0,483-0,493
<b>Cor dos Oceanos/ Fitoplâncton/ Bioquímica</b>	1000	11	0,526-0,536
		12	0,546-0,556
		13	0,662-0,672
		14	0,673-0,683
		15	0,743-0,753
		16	0,862-0,877

Fonte: Anderson et al. (2003).

Observando as bandas disponíveis, verifica-se que o sensor não possui resposta em  $0,570 \mu\text{m}$ , que é o pico de absorção do verde utilizado na fórmula do PRI. Diversos estudos recentes testaram com bom êxito outros comprimentos de onda ( $0,54 - 0,574 \mu\text{m}$ ;  $0,48 - 0,515 \mu\text{m}$  e  $0,67 - 0,68 \mu\text{m}$ ) em substituição ao  $0,57 \mu\text{m}$ , principalmente para se adequar aos sensores multiespectrais (MIDDLETON et al., 2009; GARBULSKY et al., 2008; GOERNER et al., 2011).

Nesse trabalho avaliou-se o índice do  $\text{CO}_2$ flux com as bandas 1, 4, 12 e 13 em substituição ao comprimento de onda  $0,570 \mu\text{m}$ . Ressalta-se, que essa avaliação foi realizada apenas para  $\text{CO}_2$ flux com base no NDVI, optou-se para o  $\text{CO}_2$ flux com EVI e EVI2 utilizar a banda 4, que é a mais próxima do comprimento de onda  $0,570 \mu\text{m}$ . Todas as fórmulas dos índices de vegetação utilizadas no trabalho (conforme as bandas do MODIS) e as nomenclaturas dos índices são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5** – Fórmulas dos índices de vegetação e nomenclatura dos índices utilizados no estudo.

		<b>PRI<sup>d</sup></b>	<b>CO<sub>2</sub>flux<sup>e</sup></b>
<b>NDVI<sup>a</sup></b>	$\frac{\text{Banda2} - \text{Banda1}}{\text{Banda2} + \text{Banda1}}$	$\frac{\text{Banda 11} - \text{Banda 1}}{\text{Banda 11} + \text{Banda 1}}$	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub></b>
		$\frac{\text{Banda 11} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 11} + \text{Banda 4}}$	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub></b>
		$\frac{\text{Banda 11} - \text{Banda 12}}{\text{Banda 11} + \text{Banda 12}}$	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub></b>
		$\frac{\text{Banda 11} - \text{Banda 13}}{\text{Banda 11} + \text{Banda 13}}$	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub></b>
<b>EVI<sup>b</sup></b>	$2,5 \frac{\text{Band 2} - \text{Banda1}}{\text{Banda2} + 6\text{Banda1} - 7,5\text{Banda3} + 1}$	$\frac{\text{Banda 11} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 11} + \text{Banda 4}}$	<b>CO<sub>2</sub>fluxEVI</b>
<b>EVI2<sup>c</sup></b>	$2,5 \frac{(\text{Banda2} - \text{Banda1})}{\text{Banda2} + 2,4\text{Banda1} + 1}$	$\frac{\text{Banda 11} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 11} + \text{Banda 4}}$	<b>CO<sub>2</sub>fluxEVI2</b>

a - Rouse et al. (1973); b - Huete et al. (2002); c - Jiang et al. (2008); d - Gamon; Peñuelas; Field (1992); e - Rahman et al. (2000).

Como visto na Tabela 4, apesar de disponibilizar algumas bandas com resolução de 500 metros, a feição de absorção em 0,531 µm está disponível apenas com a resolução de 1 km. Os dados de fluxo das torres micrometeorológicas são resultado da influência de uma determinada área ao redor da torre, denominada de *footprint*. Pedroza da Silva (2014) citou que algumas torres forneceram o valor do *footprint* automaticamente, no seu estudo os valores variaram de 14,15 até 207,06 ha. O estudo de Jenkins et al. (2007) estimou o PRI por meio do sensor MODIS, devido a essa limitação da resolução, utilizou apenas o pixel da torre. O estudo avaliou os valores de reflectância de 8 pixels ao redor da torre para conhecer se existia considerável variabilidade e o resultado foi insignificante.

Dessa forma, neste trabalho, devido à resolução espacial disponível do MODIS para o cálculo do PRI, o *footprint* está inserido no mesmo ponto da coordenada geográfica da torre. Assim não foi possível separar o ponto de cada torre do seu respectivo *footprint*.

### 3.3 Sistema *Eddy Covariance*

As torres micrometeorológicas utilizam a técnica de covariância de vórtices turbulentos (do inglês *eddy covariance*) para estimar o fluxo entre a vegetação e a atmosfera. O método emprega sensores de velocidade do vento em diferentes direções, a temperatura do ar e as concentrações de vapor de água e dióxido de carbono (LBA, 2007). O processo detalhado desse método está descrito no estudo de Aguiar et al. (2006).

Essa técnica possui a vantagem de fornecer medições confiáveis sem causar perturbação ao ambiente. Contudo, existem algumas limitações: (1) durante a noite, o CO<sub>2</sub> liberado pela respiração tende a se acumular dentro do dossel da floresta e a forma como esse é transferido para atmosfera não é totalmente explicado/capturado pelos sensores das torres; (2) a área de influência correspondente à medida das torres é relativamente pequena; e (3) a instalação e manutenção são de alto valor, um dos motivos de haver um número insuficiente de torres espalhadas pelo mundo para atender a diversidade de vegetações (OMETTO et al., 2005; PEREIRA et al., 2013; RODRIGUES et al., 2013).

Os dados da maioria das torres são registrados a cada 30 minutos, dessa forma, utilizaram-se os dados de 30 min de fluxo das torres que continha o tempo de aquisição da imagem MODIS. A fim de suavizar possíveis *outliers* e avaliar como reage a relação do índice espectral com a flutuação dos horários dos dados, foram testadas as observações das médias de 1 e 2 horas. A hora de passagem do sensor MODIS/TERRA é por volta de 10h30, contudo pode variar até  $\pm 1$  hora, por isso, o horário de cada imagem foi identificado individualmente.

### 3.4 Análise Estatística

A análise estatística dos dados é uma etapa essencial para entender como os dados de fluxo medidos em campo nas torres micrometeorológicas se relacionam com as variações do índice de CO<sub>2</sub>flux e possibilitar a elaboração de modelos preditivos. Os procedimentos estatísticos foram executados nos softwares BioEstat e Excel.

É importante para analisar como as variáveis se relacionam entre si conhecer se os dados possuem uma distribuição normal. Torman, Coster e Riboldi (2012) ressaltaram que determinar a forma de distribuição de probabilidade da variável é a primeira etapa para resolver problemas estatísticos possibilitando estimar seus parâmetros, construir intervalos de confiança e testar hipóteses. Com essa finalidade, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk (W), que avalia como a amostra estudada se desvia de uma distribuição normal referência com a mesma média e variância (FIELD, 2009).

Após a aplicação do teste W, constatou-se que parte dos dados não apresentaram distribuição normal, nesse caso, o recomendado é analisar a similaridade estatística por meio de um teste de hipótese não paramétrico, isso significa que o número e a natureza dos parâmetros são flexíveis. Neste caso, optou-se pelo teste Mann-Whitney (U), que é um dos testes mais utilizados, considerado similar ao teste t para distribuição normal. A hipótese nula ( $H_0$ ) do teste U estipula que os dois grupos independentes são homogêneos e têm a mesma distribuição, a hipótese alternativa ( $H_1$ ) estipula que os dados do primeiro grupo de distribuição diferem da distribuição do segundo grupo de dados (NACHAR, 2008).

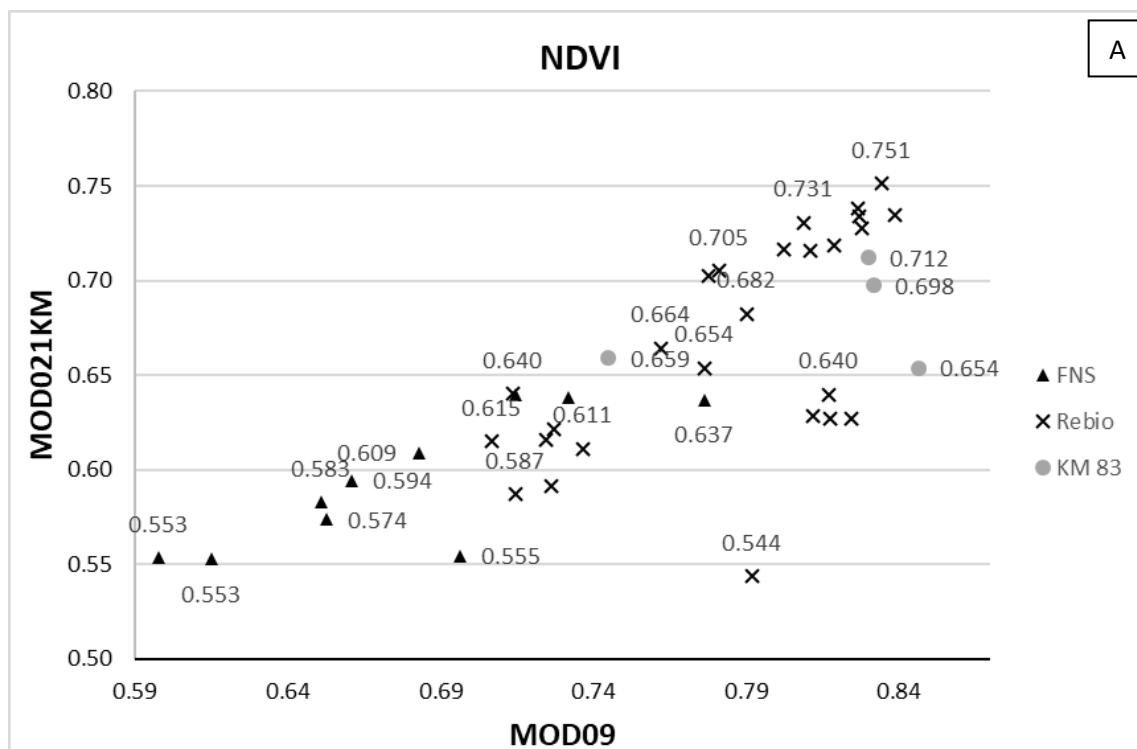
Em conclusão, os dados de fluxo de carbono obtidos das torres micrometeorológicas (variáveis independentes) foram relacionados estatisticamente com as informações dos índices de espectrais (variáveis dependentes) para obter modelos de regressão não-lineares. Para avaliar qualitativamente o grau de correlação entre duas variáveis, utilizou-se o critério similar ao definido por Callegari-Jacques (2003): nula (0,0), fraca (0 - 0,3), moderada (0,3 - 0,6), forte (0,6 - 0,9) e muito forte (0,9 - 1,0).

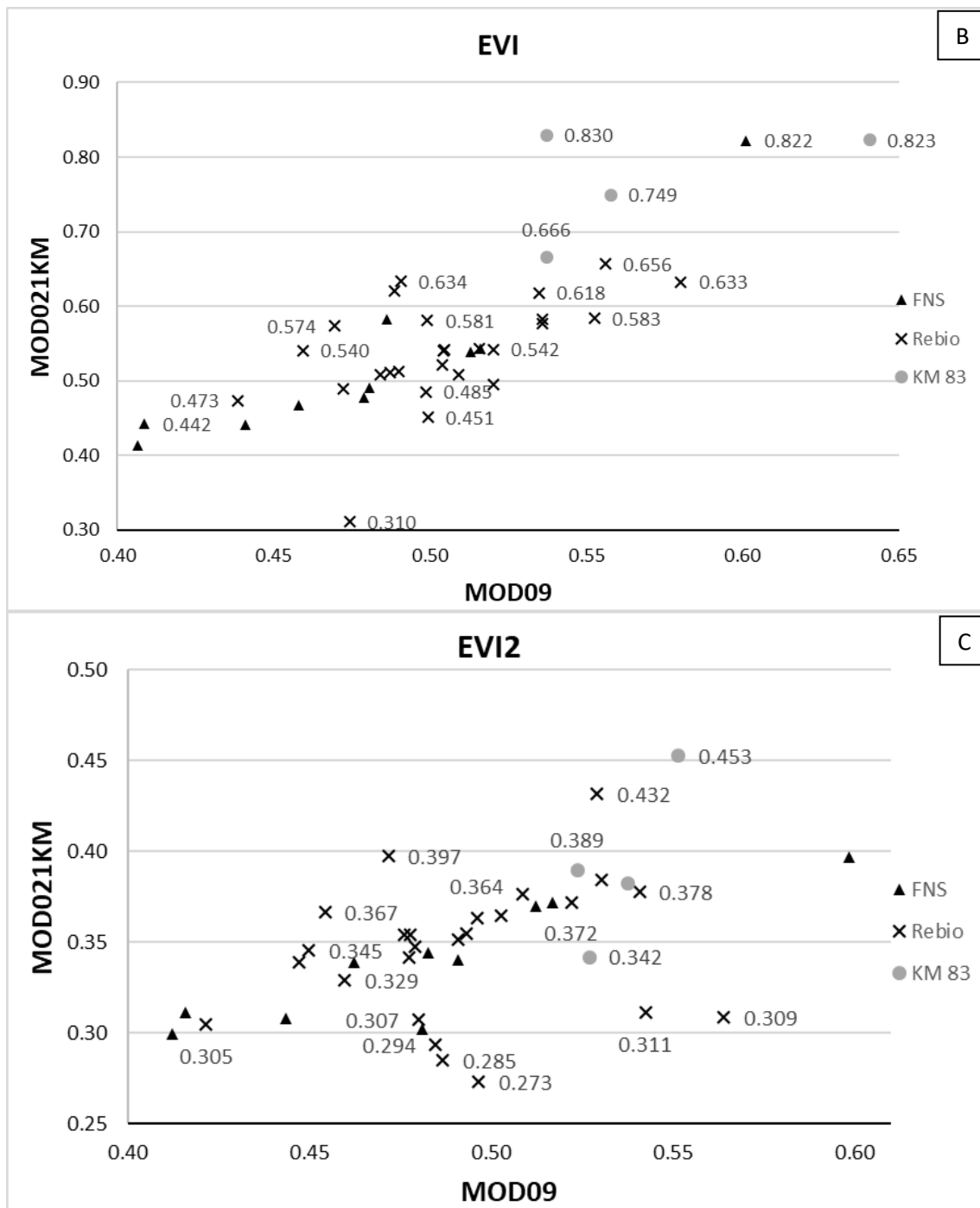


## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Índices de vegetação

Neste estudo, foram utilizadas 80 imagens, sendo metade sem correção atmosférica provenientes do produto MOD021KM e o restante das mesmas cenas do produto MOD09 que são disponibilizados com correção atmosférica, visando analisar o efeito da correção atmosférica nos índices de vegetação. Verificou-se para o cálculo do CO<sub>2</sub>flux, qual dos índices de vegetação (NDVI, EVI, EVI2) teria melhor correlação com os dados das torres micrometeorológicas para três diferentes paisagens na Amazônia: floresta primária (Rebio), exploração seletiva de madeira (km 83) e pastagem (FNS). A Figura 5 apresenta os valores encontrados para os índices de vegetação.





**Figura 5** – Gráficos de dispersão dos índices de vegetação para cenas da região amazônica com correção atmosférica (MOD09) e sem correção atmosférica (MOD21KM). A – Índice NDVI; B – Índice EVI; C – Índice – EVI2.

É possível constatar analisando a Figura 5, que os valores de NDVI e EVI2 são maiores para as imagens corrigidas do que as que não foram corrigidas, enquanto para EVI os valores são ligeiramente menores, em relação ao NDVI. Esse comportamento foi relatado em diversos trabalhos, o que demonstra a interferência das condições

atmosféricas nos valores do NDVI (SANCHES et al., 2011; BEZERRA; SILVA; BEZERRA, 2011; EDUARDO; MACHADO E SILVA., 2013).

Foram selecionadas imagens cujo ponto correspondente à localização da torre e proximidades não estavam encobertos por nuvens acarretando em uma predominância de cenas do período da seca, com exceção de uma única imagem da torre km 83 do período chuvoso. Dessa forma, não foi possível avaliar o efeito da sazonalidade nos valores dos índices estudados.

Oliveira (2015) estudou a área da torre da FNS e apontou que o estresse hídrico diminuiu os valores de NDVI em comparação ao mesmo período do ano com ocorrência de chuva, isso é explicado porque o déficit hídrico aumenta a reflectância na faixa espectral do visível e diminui na faixa espectral do infravermelho próximo. Em vista disso, caso o período chuvoso estivesse incluído nesse estudo, os valores dos índices apresentados na Figura 5 poderiam ser maiores.

Em relação ao efeito da sazonalidade no fluxo de carbono, Vourlitis et al. (2004) avaliaram uma área de floresta com a presença de uma torre micrometeorológica no Mato Grosso e encontraram que a absorção de carbono foi maior no período chuvoso. No entanto, foi observada uma diferença entre o início e o final das estações seca e chuvosa, sendo que para essa região, a vegetação aumentou a absorção de carbono ainda no final da estação seca e diminuiu a absorção no final da estação chuvosa.

Saleska et al. (2003) observaram esse mesmo padrão de sazonalidade do fluxo de carbono para os dois sítios experimentais da floresta do Tapajós (km 67 e km 83). No final da estação úmida, intensifica-se o período de senescência foliar causado pelo aumento da queda das folhas e alteração no teor dos pigmentos fotossintetizantes, assim com o passar do tempo ocorre o declínio da fotossíntese e conseqüentemente a diminuição da absorção de carbono. Esse período é seguido por aumentos da brotação de folhas com alta capacidade fotossintética que irá aumentar a absorção de carbono do dossel no final da estação seca.

Aguiar et al. (2006) encontraram para a região das torres de Rondônia que as condições atmosféricas se diferenciam durante a estação seca, principalmente em relação a concentração de gases e aerossóis. Esse fenômeno é ocasionado pela grande ocorrência de queimadas na região durante a seca que aumenta a quantidade de partículas suspensas no ar, bloqueando parte da radiação solar incidente.

Foi calculada a análise estatística descritiva para os índices de vegetação com o objetivo de sintetizar o comportamento dos dados (Tabela 6).

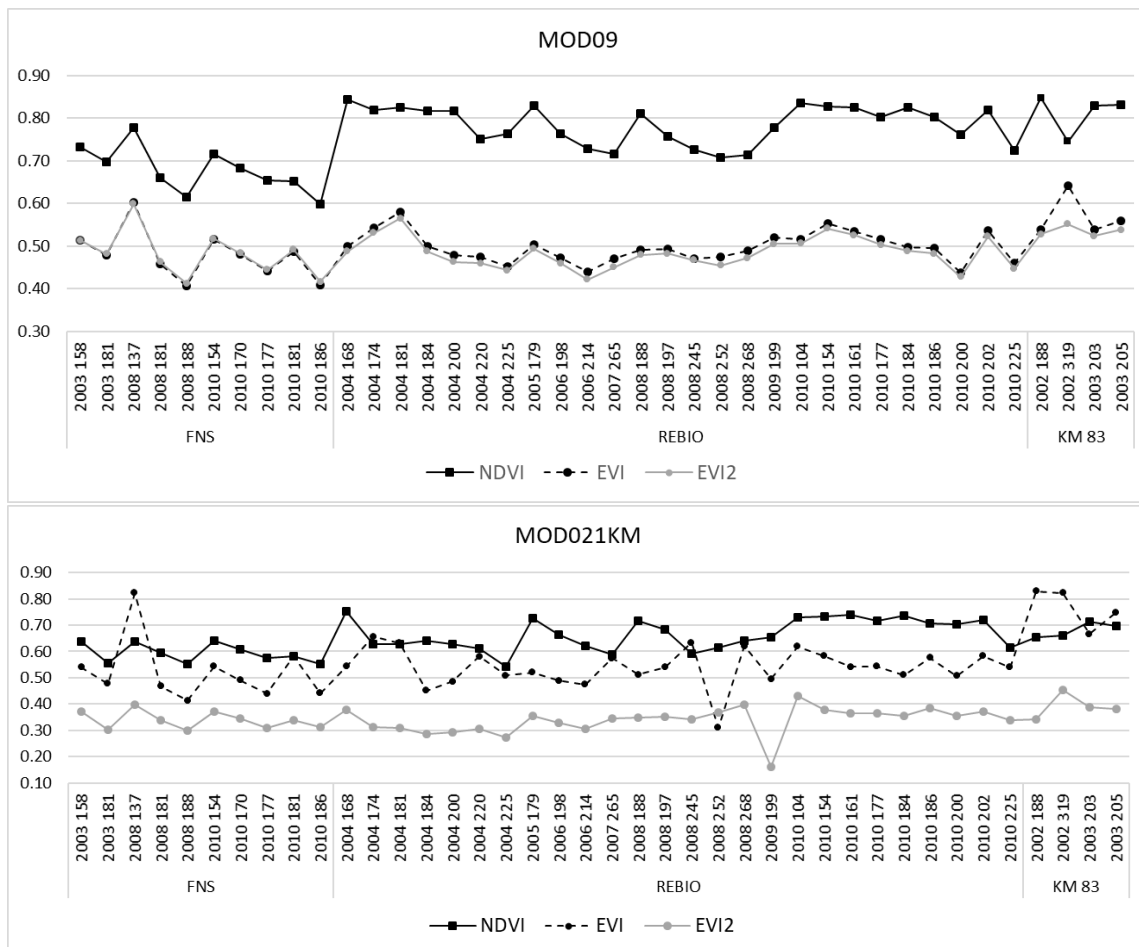
**Tabela 6** – Análise descritiva para os índices de vegetação.

<b>Descrição</b>	<b>MOD09</b>			<b>MOD021KM</b>		
	NDVI	EVI	EVI2	NDVI	EVI	EVI2
<b>Número de Amostras</b>	40	40	40	40	40	40
<b>Média</b>	0.760	0.499	0.488	0.650	0.558	0.343
<b>Mínimo</b>	0.598	0.407	0.412	0.544	0.310	0.160
<b>Máximo</b>	0.847	0.641	0.599	0.751	0.830	0.453
<b>Variância</b>	0.005	0.002	0.002	0.004	0.012	0.002
<b>Desvio Padrão</b>	0.067	0.048	0.042	0.060	0.109	0.048
<b>Erro Padrão</b>	0.011	0.008	0.007	0.009	0.017	0.008

Para os dados do MOD09, os índices de vegetação apresentaram os seguintes valores médios, o NDVI de 0,760 (desvio padrão 0,067), o EVI2 de 0,488 (desvio padrão de 0,042) e o EVI de 0,499 (desvio padrão de 0,048). Os valores encontrados por Pedroza da Silva (2014) utilizando o sensor Hyperion foram ligeiramente menores para as mesmas regiões, enquanto o desvio-padrão foi maior. Para os dados do MOD021KM, o NDVI apresentou valores médios de 0,650 (desvio-padrão de 0,060), os valores de EVI2 obtiveram média de 0,343 (desvio-padrão de 0,048), e EVI apresentaram média de 0,558 (desvio-padrão de 0,109).

O NDVI para as imagens corrigidas obteve valor mínimo de 0,598 e máximo de 0,847, respectivamente para as áreas de pastagem e manejo florestal. Pedroza da Silva (2014) encontrou valores bem menores para a área da FNS (0,319 e 0,294). Um provável motivo dessa diferença é que neste trabalho as cenas da FNS se concentraram no mês de junho, enquanto os resultados de Pedroza da Silva são do mês de agosto, quando a pastagem está mais seca depois de um período maior de estiagem.

A Figura 6 apresenta dois gráficos com os valores de índice de vegetação para todas as cenas que contrastam a diferença entre os índices das imagens com e sem correção atmosférica.



**Figura 6** – Comportamento dos índices de vegetação NDVI, EVI e EVI2 para as imagens do sensor MODIS com correção atmosférica (MOD09) e sem correção atmosférica (MOD021KM).

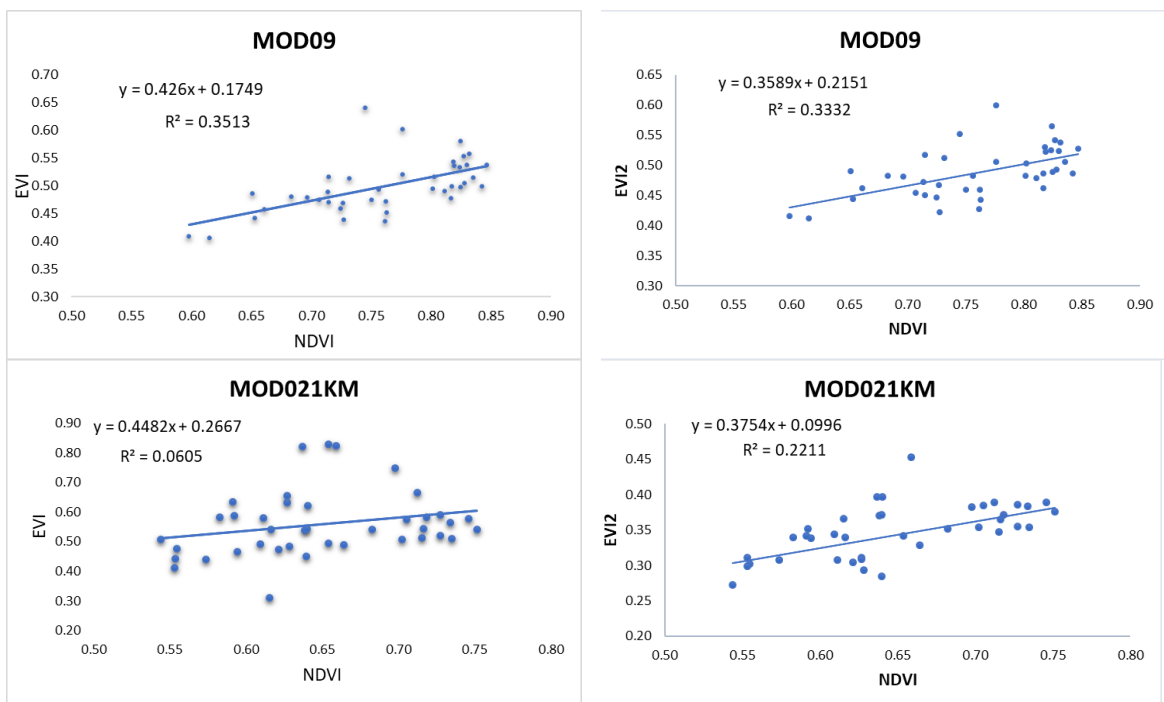
Dessa forma, verifica-se mais claramente o efeito da correção atmosférica na série de dados dos índices de vegetação. Os dados das imagens do MOD09 seguem um comportamento mais uniforme, enquanto o produto MOD021KM possui cenas com valores discrepantes de EVI. É possível observar que para produto MOD09 os valores de NDVI são bem mais elevados apresentando dados ligeiramente superestimados para as áreas florestais (Rebio e km 83) em comparação com as cenas da área de fazenda.

Os índices EVI e o EVI2 para as imagens com correção atmosférica possuem valores bastante semelhantes, o mesmo padrão não foi observado para as imagens sem correção atmosférica. Segundo Jiang et al. (2008), o EVI2 foi desenvolvido para substituir o EVI para o uso em satélites sem a banda do azul que fornece pouca ou nenhuma informação biofísica. Os autores ressaltam que para a substituição ser mais exata os pixels devem ter boa qualidade e terem correção atmosférica. Isso justifica

porque os valores de EVI e EVI2 para as imagens do MOD021KM apresentaram valores mais diferenciados entre si.

O efeito da correção atmosférica para o índice EVI foi avaliado no artigo de Carvalho e Baptista (2015). Foram observados seis alvos extraídos de cenas do *RapidEye*: água, área urbana, solo exposto, mata de galeria, vegetação campestre e vegetação de Cerrado. As análises estatísticas não identificaram diferenças significativas para o cálculo do EVI entre executar ou não a correção atmosférica. Os modelos obtidos a partir da regressão linear apresentaram alta correlação e coeficientes de determinação superiores a 0,9.

Os índices de vegetação exploram de forma diferenciada o potencial das bandas do vermelho e infravermelho próximo e no caso do EVI também a banda do azul, conseqüentemente os índices apresentam algum tipo de correlação. Dessa forma, foi verificada a relação dos índices considerando o NDVI como variável independente e o EVI e EVI2 como variáveis dependentes (Figura 7).



**Figura 7** - Relação linear entre os índices de vegetação NDVI com os índices EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica (MOD09) e sem correção atmosférica (MOD021KM).

Para o produto MOD09, houve uma correlação positiva moderada aproximadamente 0,6 com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) baixos de 0,351 para o EVI e 0,333 para o EVI2. Pedroza da Silva (2014) avaliou a relação desses índices e

encontrou valores de coeficientes de determinação maiores, de 0,69 para EVI e de 0,70 para o EVI2.

Em outro estudo, Pedroza da Silva e Baptista (2013), analisando apenas a área da torre km 83 também com sensor Hyperion obtiveram coeficientes de determinação de 0,53 para o EVI e de 0,37 para o EVI2.

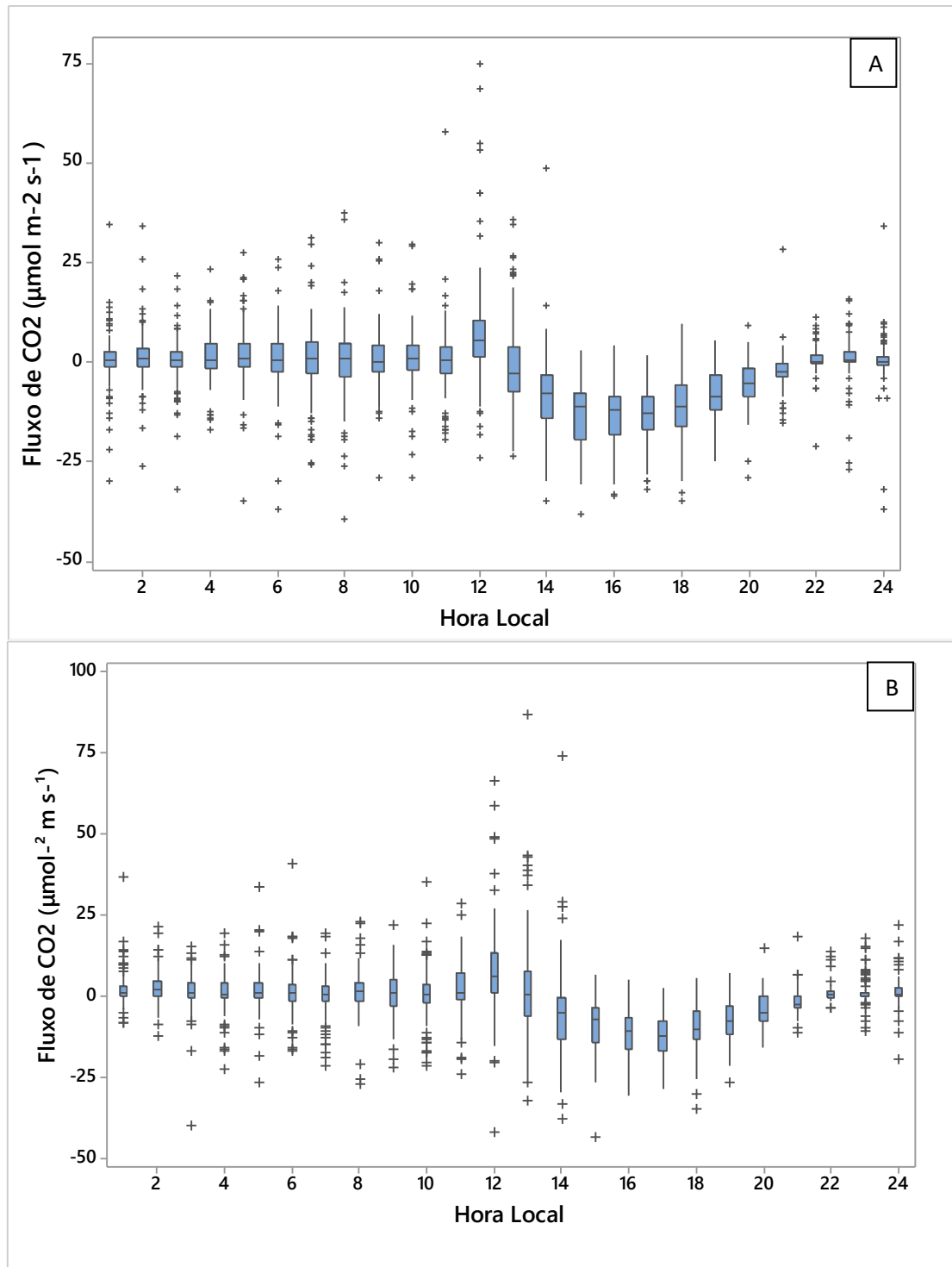
Os índices de vegetação das imagens dos produtos MOD021KM obtiveram uma relação menor ainda. Os coeficientes de correlação foram respectivamente de 0,221 e 0,470 para o EVI e EVI2, enquanto os coeficiente de determinação foram de 0,061 para o EVI e 0,221 para o EVI2. Como citado, o EVI possui o diferencial de incluir a banda do azul no seu cálculo, por esse motivo a relação do NDVI com o EVI2 é maior.

#### **4.2 Fluxos de Carbono das Torres Micrometeorológicas**

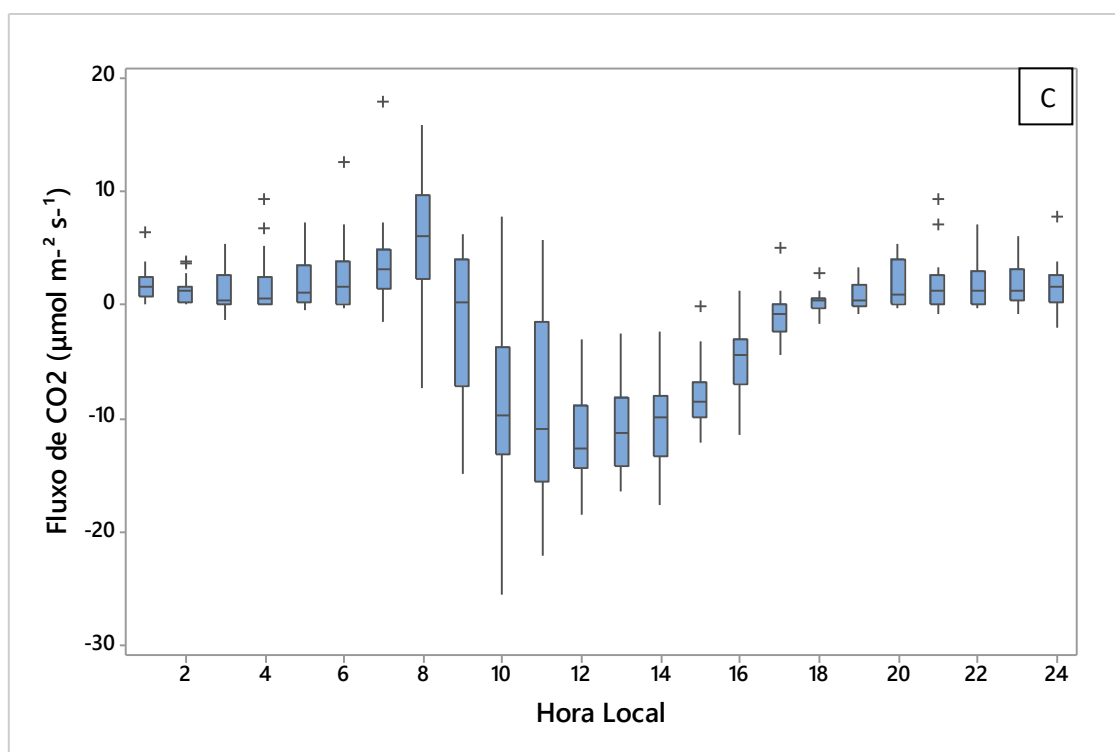
Os dados das torres micrometeorológicas são apresentados usando a convenção de sinais da ciência atmosférica. O fluxo negativo indica que o deslocamento do fluxo líquido de CO<sub>2</sub> é descendente, ou seja, a vegetação está absorvendo carbono, enquanto o fluxo positivo é caracterizado pela predominância da liberação de carbono (GOULDEN et al., 2004).

O fluxo de CO<sub>2</sub> das áreas de estudo são medidos nas torres micrometeorológicas por meio da técnica de Covariância de Vórtices Turbulentos (*Eddy Covariance*). Os dados das torres são obtidos, predominantemente, a cada 30 minutos continuamente ao longo do dia. O período de tempo correspondente aos dados variou conforme a região, para a FNS (pastagem) de 2006 a 2010 (114 dias), para a Rebio (floresta nativa) de 2002 a 2010 (109 dias) e para km 83 (manejo florestal) de 2002 e 2003 (24 dias). Dessa forma, deve-se considerar que o número de dias total e o período do ano para cada sítio experimental exercerá influência nas médias de fluxos diárias.

Como as imagens de satélite selecionadas são do período da seca, optou-se por padronizar os dados e restringir o cálculo da média da flutuação diária do fluxo de carbono para os meses da estação seca. A Figura 8 apresenta os gráficos com as variações diárias do fluxo de carbono para as três áreas estudadas.







**Figura 8** – Médias ao longo do dia do fluxo de CO<sub>2</sub> em áreas da região amazônica obtidos por meio de medições de torres micrometeorológicas: A – pastagem (RO), B – floresta nativa (RO) e C - manejo florestal (PA). As caixas verticais contêm 50% dos valores encontrados incluindo a mediana para cada horário, enquanto os pontos que estão fora das caixas são considerados valores discrepantes.

Verificou-se para as áreas de pastagem e floresta nativa que o fluxo de carbono possui uma grande amplitude de valores, principalmente para os horários em torno do meio dia, por exemplo, para a área de pastagem nesse horário o fluxo de carbono variou de -25 a 75  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . A área de manejo florestal apresentou uma menor variabilidade, porém isso provavelmente deve ser atribuído ao fato dos dados serem de um período de tempo menor, que não captou toda a variância do fluxo da área, do que relacionado as características da vegetação.

A floresta nativa e a pastagem (ambas em Rondônia) apresentaram valores próximos de zero ou ligeiramente positivos de fluxo de carbono entre 20h30 a 12h30, ou seja, a vegetação está predominantemente liberando carbono para a atmosfera. Silva Júnior et al. (2004) estudaram essas duas regiões e concluíram que o comportamento do fluxo de CO<sub>2</sub> nas florestas tropicais é similar ao da pastagem.

Para a área de manejo florestal que está localizada no estado do Pará, o período de fluxo positivo ou nulo variou de 17h30 até 9h30, apesar da diferença dos horários entre as torres dos dois estados, a duração do fluxo positivo ou nulo foi igual, cerca de

16 horas, englobando todo o período noturno e porção do período diurno. Dessa forma, as 8 horas restantes do dia apresentam valores negativos de fluxo, período em que a participação da fotossíntese predomina sobre o valor líquido do fluxo.

A média diária dos fluxos de carbono para os períodos e regiões estudados foram negativos: a) -  $2,41 \pm 5,89 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (FNS); b) -  $1,44 \pm 5,18 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Rebio) e c) -  $1,49 \pm 5,4 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (km 83). Dessa forma, apesar da maior parte do dia o fluxo ser nulo ou ligeiramente positivo, as médias diárias confirmam os estudos que mostram o potencial da vegetação da região amazônica para captar carbono do ambiente. Em comparação com o bioma caatinga, o trabalho de Santos (2017) obteve durante a estação valores positivos para o fluxo de carbono para a caatinga preservada, variando entre  $0,5$  e  $3,0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  para o período diurno e entre  $0,6$  e  $1,7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  durante a noite. Apenas a Caatinga em regeneração apresentou fluxo com valores negativos de carbono, as médias oscilaram no período diurno entre  $-1,9$  e  $2,1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  e  $1,2$  a  $3,0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  no período noturno.

Destaca-se que a área de pastagem obteve a maior taxa de absorção de carbono, diferentemente do estudo de El Marsi et al. (2013), que encontrou fluxo neutro para esse mesmo sítio experimental para o período de janeiro a novembro de 2001.

Kruijt et al. (2004) estudaram o comportamento do fluxo de carbono ao longo do dia durante dois anos (1999-2000) para a torre km 34 (floresta primária) que fica perto de Manaus. Essa apresentou um comportamento semelhante ao da torre km 83, ou seja, por volta das 8h00 há um pequeno aumento da liberação de carbono e a partir desse momento, a absorção de carbono aumenta, alcançando o pico perto do meio dia.

O trabalho de Goulden et al. (2004) teve como objetivo avaliar o fluxo de carbono da área de manejo florestal (km 83) para o período de julho de 2000 a julho de 2001. A taxa de fotossíntese para o mesmo teor de irradiação foi menor na parte da tarde do que da manhã. Inúmeros fatores foram apontados para explicar esse comportamento: aumento da evapotranspiração; redução da fotossíntese pela maior temperatura do período da tarde em comparação com o período matutino; acumulação de amido e metabolitos ao longo do dia; e característica de ritmo de fluxo intrínseca da vegetação. A luz foi apontada como o fator controlador principal da troca de  $\text{CO}_2$ , representando 48% da variância a cada meia hora.

Aguiar et al. (2006) pesquisaram a Rebio Jaru no ano de 2004, em que diversos fatores foram analisados, dentre eles, o ciclo sazonal do fluxo de carbono. Verificou-se que as médias do ciclo diurno do fluxo líquido de carbono para o período

seco foram menores do que as médias encontradas na estação chuvosa. Os autores sugeriram que à diminuição das chuvas e a consequente redução da umidade no solo foram as causas das taxas de absorção de CO<sub>2</sub> menores para a estação seca.

### **4.3 Modelagem do Sequestro de Carbono**

Os resultados apresentados nessa seção fazem referência ao objetivo principal deste trabalho, que foi analisar as relações estatísticas dos índices de vegetação extraídos das imagens diárias do sensor MODIS, com e sem correção atmosférica, com os dados das medições das torres micrometeorológicas. Foi avaliado qual dos índices espectrais propostos obteve melhor relação com os valores dos fluxos das torres em três formas de aquisição dos dados, ou seja, por meio de dados coletados em meia, uma e duas horas com base no horário de passagem do sensor para cada cena.

#### **4.3.1 Análise da Normalidade**

Primeiramente, foi verificada a normalidade dos dados por meio do teste Shapiro-Wilk (teste W) (Tabela 7). Se o teste é não-significativo ( $p > 0,05$ ), isso indica que os dados das amostras não divergem significativamente de uma distribuição normal, podendo ser considerados como normais. No entanto, se o teste é significativo ( $p < 0,05$ ), os dados possuem distribuição significativamente diferente de uma distribuição normal, ou seja, essa não é normal.

**Tabela 7** – Teste de Normalidade Shapiro-Wilk (W) para os índices espectrais e dados das torres micrometeorológicas.

	<b>Teste W</b>	<b><i>p</i>- Valor*</b>
<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub></b>	MOD09	<i>0,03</i>
	MOD21KM	0,12
<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub></b>	MOD09	<i>0,03</i>
	MOD21KM	0,21
<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub></b>	MOD09	<i>0,01</i>
	MOD21KM	0,18
<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub></b>	MOD09	0,09
	MOD21KM	<i>0,01</i>
<b>CO<sub>2</sub>fluxEVI</b>	MOD09	0,09
	MOD21KM	<i>0,01</i>
<b>CO<sub>2</sub>fluxEVI2</b>	MOD09	0,52
	MOD21KM	0,83
<b>sPRI<sub>1</sub></b>	MOD09	0,07
	MOD21KM	0,26
<b>sPRI<sub>4</sub></b>	MOD09	0,78
	MOD21KM	<i>0,01</i>
<b>sPRI<sub>12</sub></b>	MOD09	<i>0,01</i>
	MOD21KM	<i>0,03</i>
<b>sPRI<sub>13</sub></b>	MOD09	<i>0,01</i>
	MOD21KM	<i>0,01</i>
<b>NDVI</b>	MOD09	0,09
	MOD21KM	0,06
<b>EVI</b>	MOD09	0,5
	MOD21KM	<i>0,01</i>
<b>EVI2</b>	MOD09	0,9
	MOD21KM	<i>0,02</i>
<b>Fluxo de CO<sub>2</sub></b>	30 min	<i>0,01</i>
	1 h	<i>0,001</i>
	2 h	<i>0,001</i>

\* os valores apresentados em itálico não se ajustaram à normalidade; os sem itálico, sim.

Observa-se, para os índices de vegetação, que nem todas as variáveis possuem normalidade dos dados, considerando o *p*-valor calculado ao nível de significância de 5%. O teste de normalidade para os dados de fluxo das torres demonstrou que nenhuma variável apresenta distribuição normal.

Em razão da maior parte dos dados não obedecerem a distribuição normal, foi efetuado um teste de hipótese não paramétrico. Esses testes geralmente são menos exigentes que os testes paramétricos. Em particular, os testes não paramétricos não exigem que a população tenha uma distribuição específica, como a distribuição normal (LAROSE, 2013). O objetivo de um teste de hipóteses é determinar se a hipótese

proposta acerca de um parâmetro da população é plausível conforme a informação obtida a partir de uma amostra extraída dessa população (FIRMINO, 2015).

Dessa forma para avaliar a similaridade estatística, realizou-se o teste de Wilcoxon Mann-Whitney (W) (Tabela 8).

Foram constituídas duas hipóteses:

- 1) H0: não há diferença entre as informações obtidas a partir dos índices espectrais estimados de cenas do sensor MODIS e dos dados de fluxo ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) de CO<sub>2</sub> medido nas torres micrometeorológicas.
- 2) H1: há diferença entre as informações obtidas a partir dos índices espectrais estimados de cenas do sensor MODIS e dos dados do fluxo ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) de CO<sub>2</sub> medido nas torres micrometeorológicas.

**Tabela 8** – Teste Wilcoxon-Mann-Whitney (U) para os índices espectrais e fluxo de carbono.

Teste U		Fluxo de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )				
		30 min	1h	2h		
<i>p</i> -valor	CO <sub>2</sub> flux <sub>1</sub>	MOD09	0,711	0,889	0,548	
		MOD021KM	0,704	0,912	0,522	
	CO <sub>2</sub> flux <sub>4</sub>	MOD09	0,718	1,000	0,443	
		MOD021KM	0,733	1,000	0,444	
	CO <sub>2</sub> flux <sub>12</sub>	MOD09	0,711	1,000	0,444	
		MOD021KM	0,733	1,000	0,444	
	CO <sub>2</sub> flux <sub>13</sub>	MOD09	0,704	0,821	0,593	
		MOD021KM	0,919	0,927	0,405	
	CO <sub>2</sub> fluxEVI	MOD09	0,740	0,829	0,310	
		MOD021KM	0,973	0,981	0,427	
	CO <sub>2</sub> fluxEVI2	MOD09	0,725	0,799	0,296	
		MOD021KM	0,704	0,690	0,250	
	<i>p</i> -valor	sPRI <sub>1</sub>	MOD09	0,700	0,482	0,700
			MOD021KM	0,700	0,424	0,700
sPRI <sub>4</sub>		MOD09	0,700	0,716	0,693	
		MOD021KM	0,700	0,441	0,700	
sPRI <sub>12</sub>		MOD09	0,700	0,707	0,693	
		MOD021KM	0,700	0,441	0,700	
sPRI <sub>14</sub>		MOD09	0,700	0,452	0,693	
		MOD021KM	0,977	0,672	0,474	
EVI		MOD09	0,700	0,525	0,404	
		MOD021KM	0,672	0,447	0,686	
EVI2		MOD09	0,700	0,570	0,679	
		MOD021KM	0,721	1,000	0,447	
NDVI		MOD09	0,488	0,171	0,700	
		MOD021KM	0,630	0,340	0,700	

Conforme a Tabela 8, os valores de p para todas as variáveis são maiores que o nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), ou seja, a hipótese nula deve ser aceita. Assim, é possível afirmar que existe similaridade estatística entre os índices espectrais

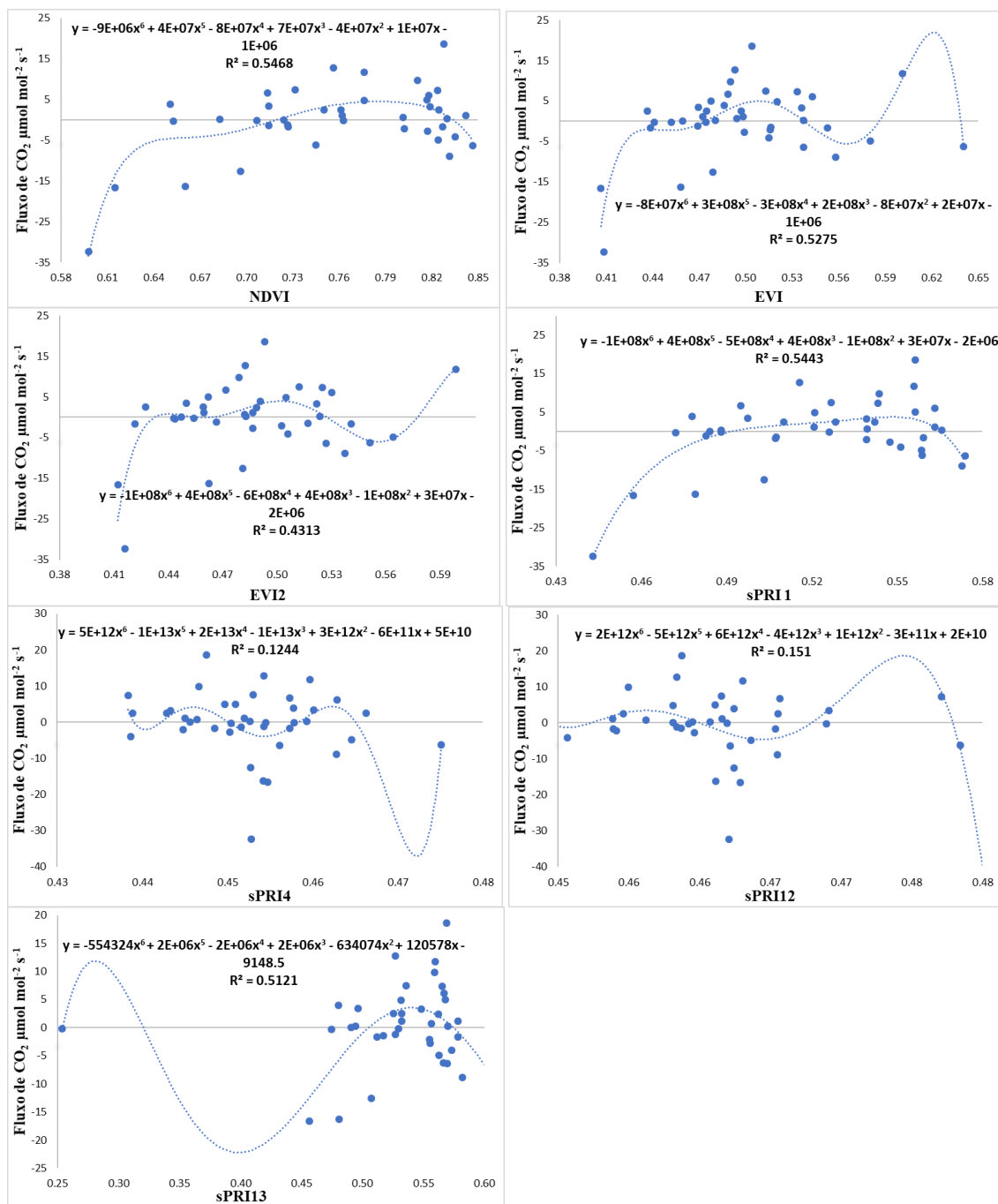
calculados e os dados de fluxo de carbono medidos pelos sensores instalados nas torres micrometeorológicas para os sítios experimentais estudados.

#### 4.3.2 Análise dos Índices de Vegetação: NDVI, EVI, EVI2 e sPRI

Os índices espectrais (sPRI, NDVI, EVI e EVI2) foram correlacionados com o fluxo de carbono a fim de compreender o comportamento isolado de cada índice, considerando também, que diversos trabalhos utilizam apenas esses índices para estimar parâmetros relacionados ao balanço de energia da vegetação.

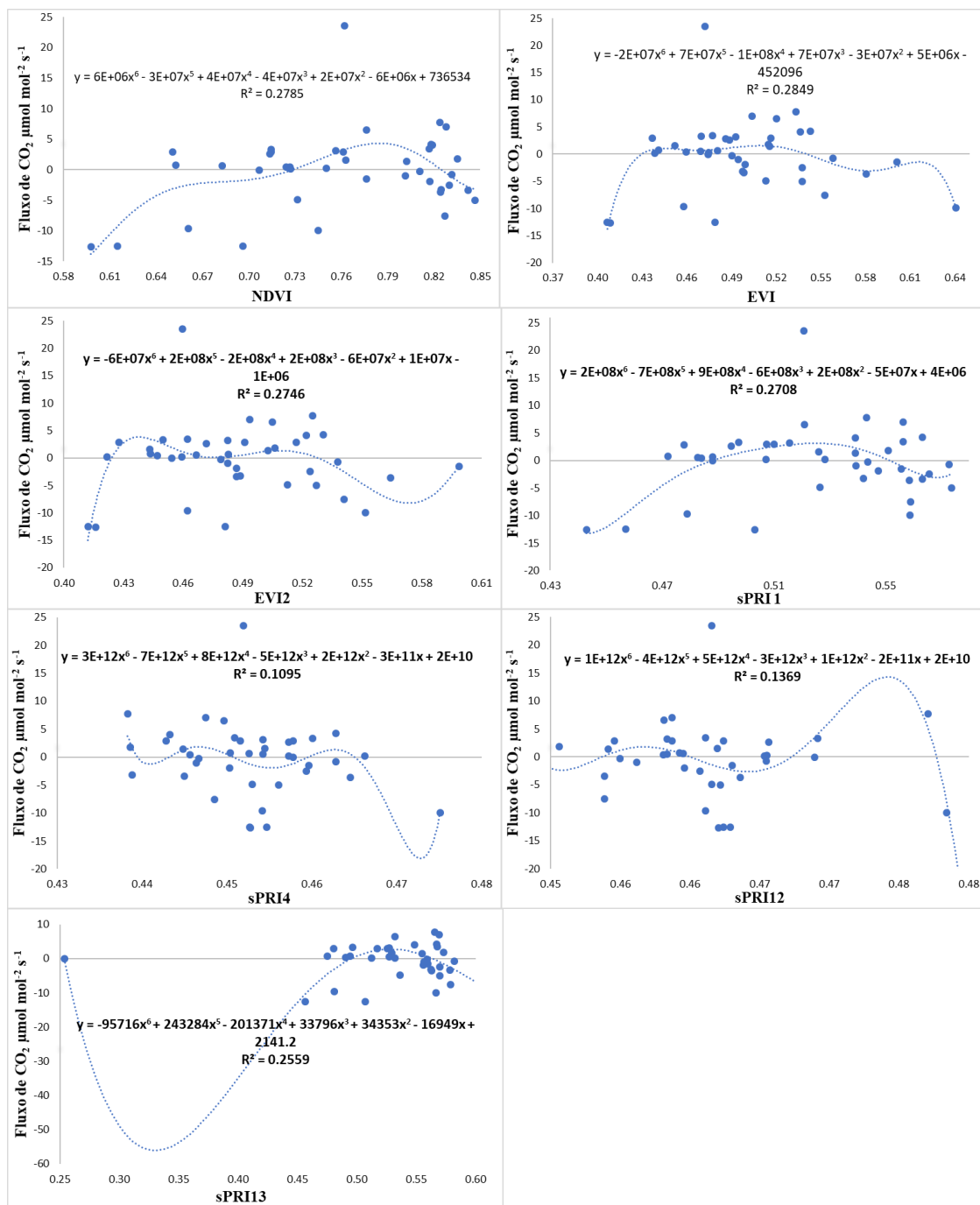
Desse modo, para explicar a relação entre essas variáveis, tendo os índices espectrais obtidos pelas imagens de satélite como variável independente (X) e o fluxo de carbono medido em campo como variável dependente (Y), aplicou-se a análise de regressão. O modelo de regressão linear não obteve resultados satisfatórios para esse conjunto de dados. Adotou-se então, o modelo de regressão polinomial. Pedroza da Silva (2014) também ajustou os modelos do seu estudo a uma função não linear com regressão polinomial.

A análise foi realizada para dois grupos distintos de dados: índices espectrais das imagens com correção atmosférica (MOD09) e índices espectrais sem correção atmosférica (MOD021KM). Para cada grupo, foram testados os modelos com os três períodos de valores de fluxo de carbono: 1) valores de meia hora em torno do momento de passagem do sensor; 2) média de observação de 1 hora em torno do momento de passagem do sensor; e 3) média de observações de 2 horas em torno do momento de passagem do sensor (Figuras 9 a 14).



**Figura 9** - Ajustes dos índices sPRI<sub>1</sub>, sPRI<sub>4</sub>, sPRI<sub>12</sub>, sPRI<sub>13</sub>, NDVI, EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de CO<sub>2</sub> com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor.

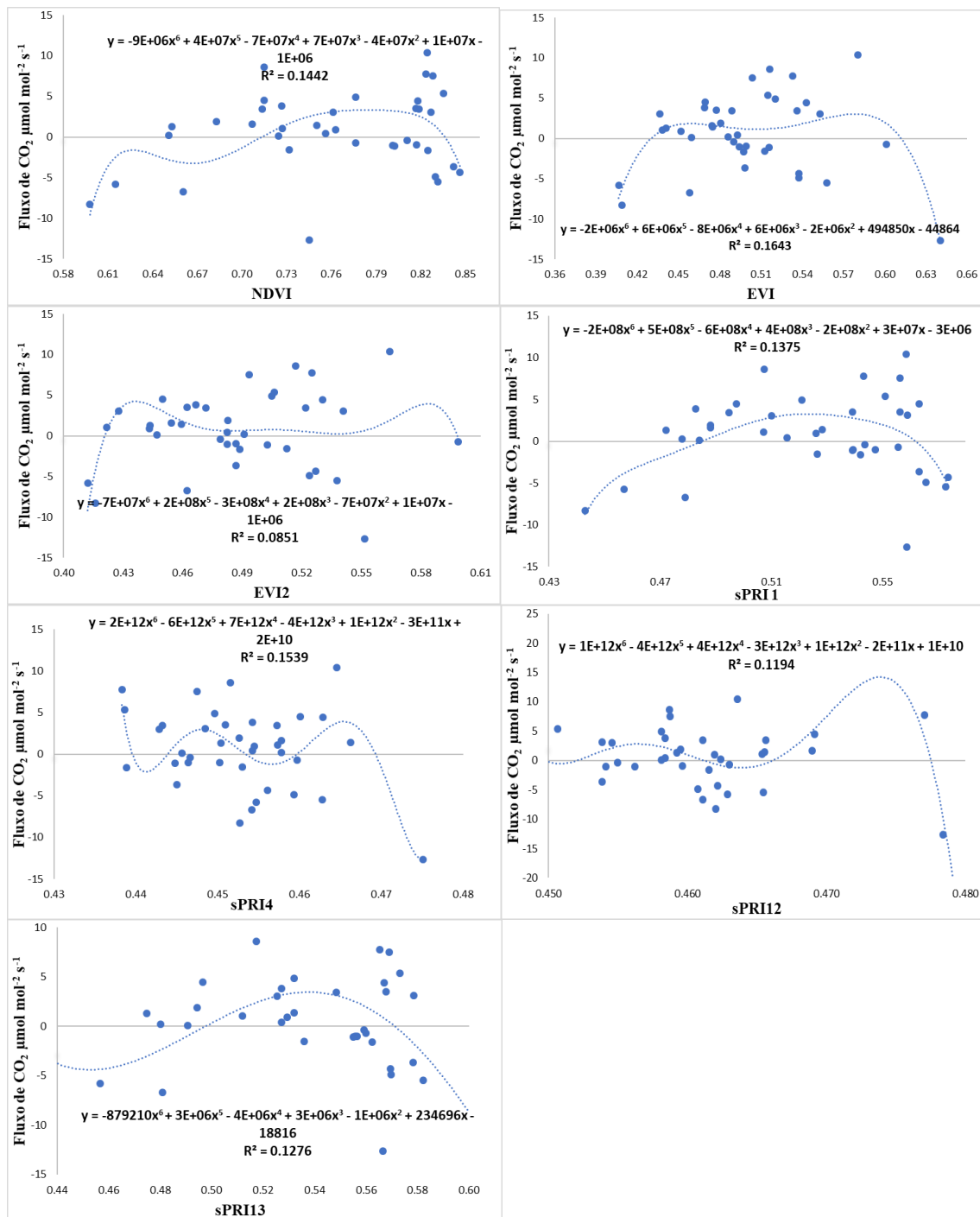
Observa-se pelos gráficos que o melhor ajuste foi obtido pelo índice NDVI (R<sup>2</sup> = 0,547) e os piores resultados foram alcançados pelo sPRI<sub>4</sub> e sPRI<sub>12</sub> com o coeficiente de determinação de 0,124 e 0,151, respectivamente.



**Figura 10** - Ajustes dos índices sPRI<sub>1</sub>, sPRI<sub>4</sub>, sPRI<sub>12</sub>, sPRI<sub>13</sub>, NDVI, EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de CO<sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor.

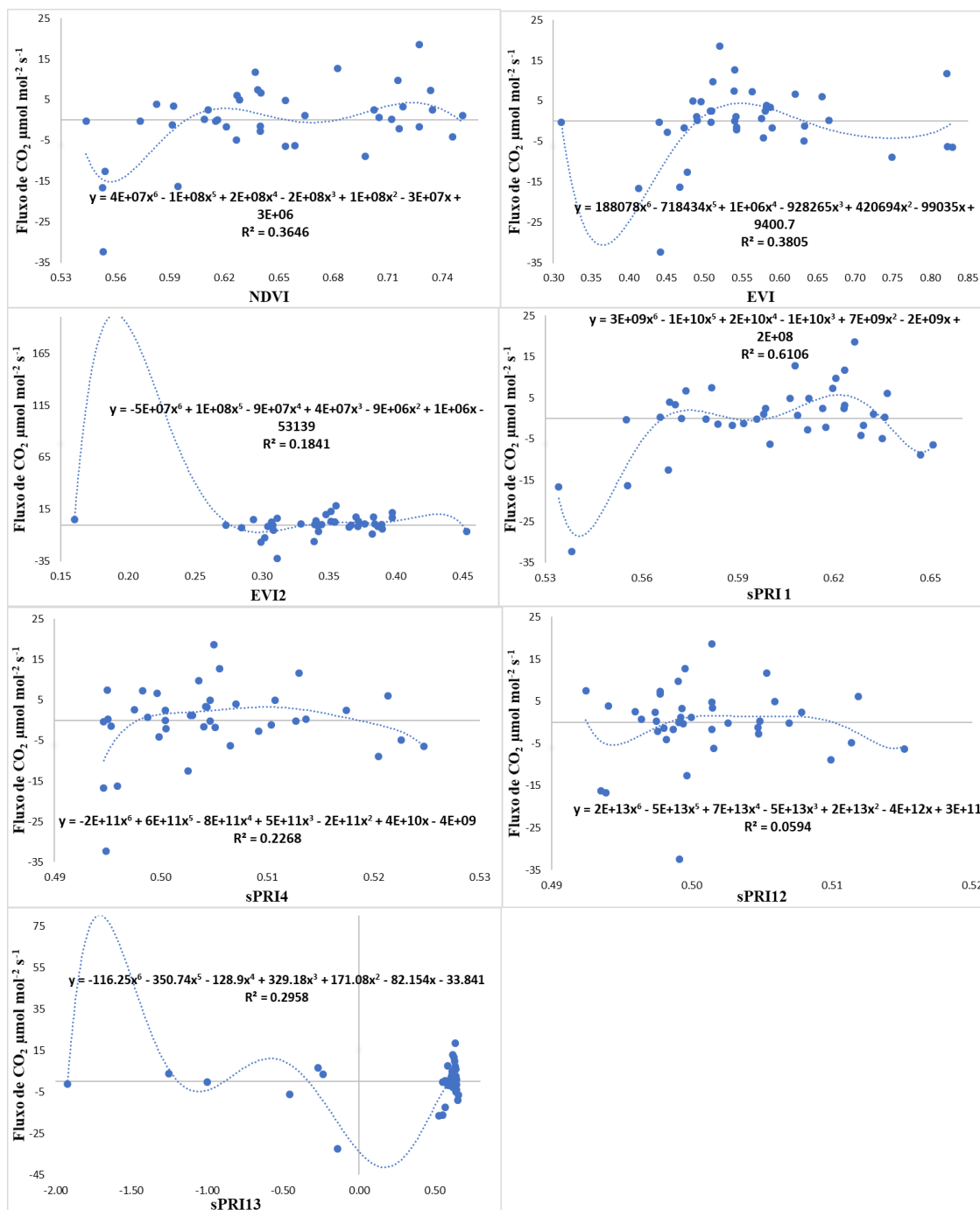
É possível verificar que os índices de vegetação obtiveram um coeficiente de determinação semelhantes por volta de 0,27, com exceção do sPRI<sub>4</sub> e sPRI<sub>12</sub> que apresentaram valores menores.





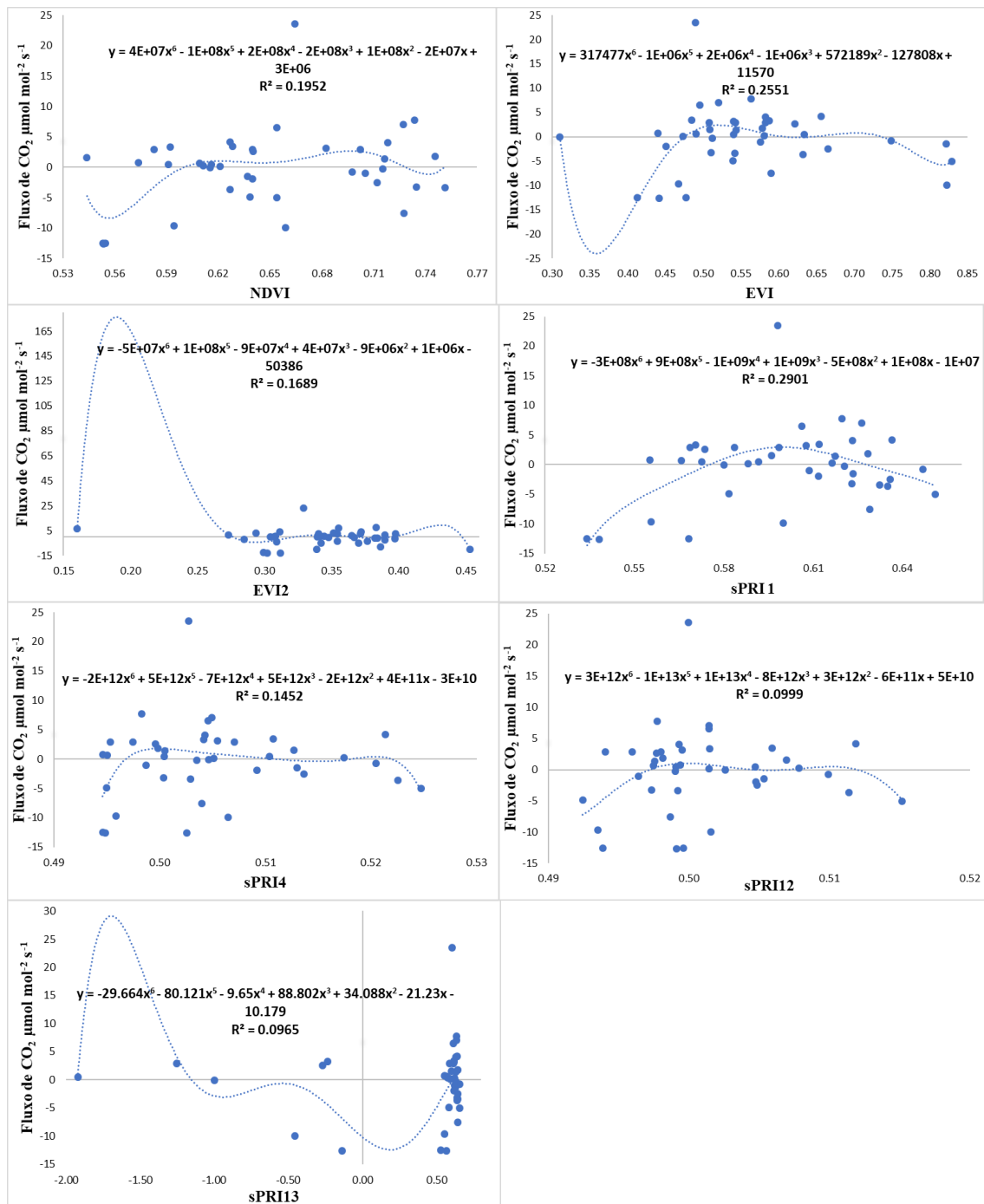
**Figura 11-** Ajuste dos índices sPRI<sub>1</sub>, sPRI<sub>4</sub>, sPRI<sub>12</sub>, sPRI<sub>13</sub>, NDVI, EVI e EVI2 para imagens com correção atmosférica com dados do fluxo de CO<sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor.

Verificou-se por meio da avaliação das Figuras 9, 10 e 11, a tendência de diminuição do coeficiente de determinação à medida que se utiliza para a modelagem observações mais distantes do momento de passagem do sensor.



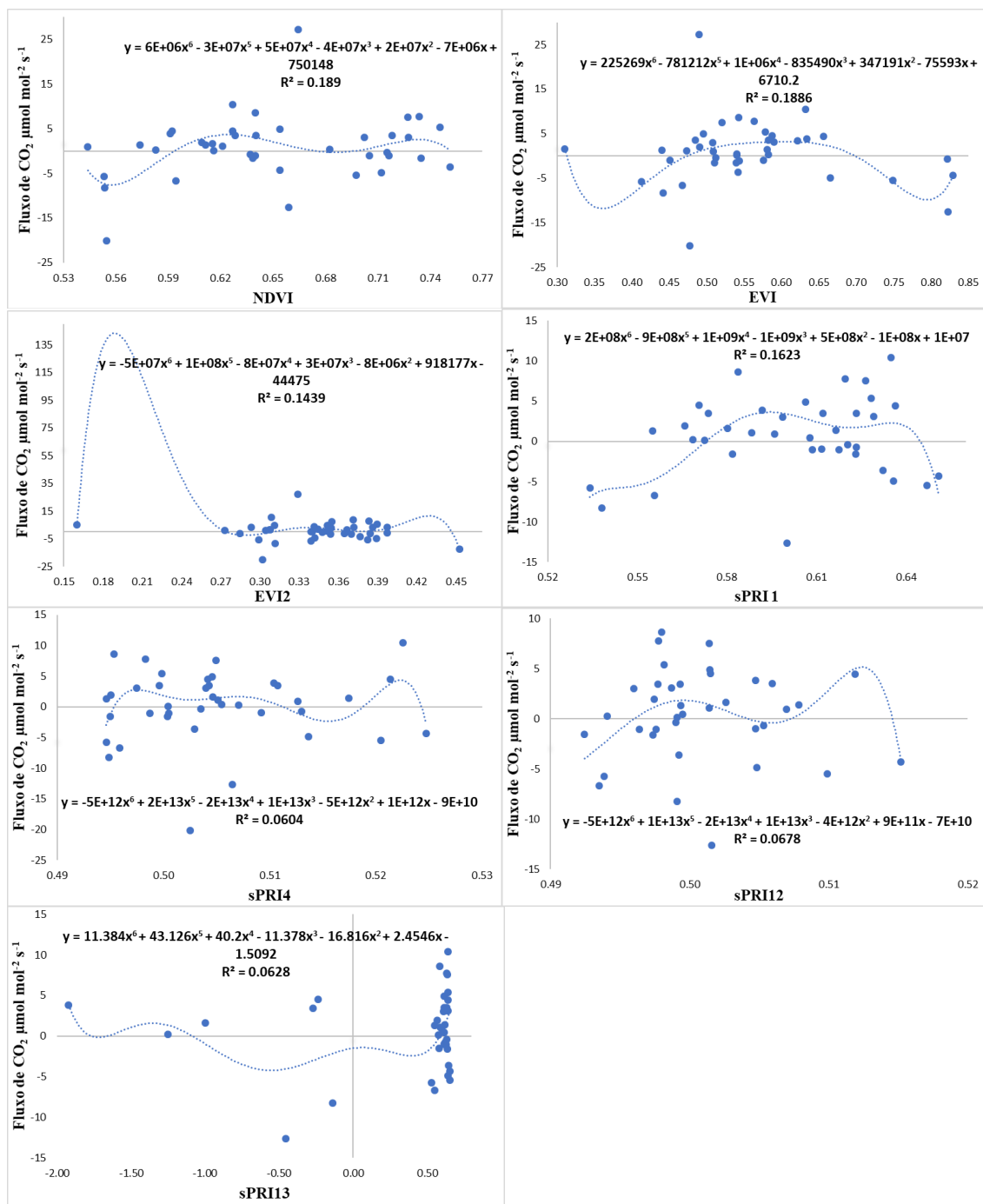
**Figura 12** - Ajustes dos índices sPRI<sub>1</sub>, sPRI<sub>4</sub>, sPRI<sub>12</sub>, sPRI<sub>13</sub>, NDVI, EVI e EVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de fluxo de CO<sub>2</sub> com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor.

De acordo com os gráficos da Figura 12, o índice sPRI<sub>1</sub> apresentou o maior coeficiente de determinação (0,611), enquanto o sPRI<sub>12</sub> obteve coeficiente de determinação praticamente nulo (0,059).



**Figura 13** - Ajustes do índice sPRI<sub>1</sub>, sPRI<sub>4</sub>, sPRI<sub>12</sub>, sPRI<sub>13</sub>, NDVI, EVI e EVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de CO<sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor.

Verifica-se na Figura 13 que todas as modelagens para as imagens sem correção atmosférica com dados de CO<sub>2</sub> com observações de uma hora obtiveram coeficientes de determinação fracos, sendo que o maior foi para o sPRI<sub>1</sub> (0,29).



**Figura 14-** Ajustes do índice sPRI<sub>1</sub>, sPRI<sub>4</sub>, sPRI<sub>12</sub>, sPRI<sub>13</sub>, NDVI, EVI e EVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de CO<sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor.

Como visto, as Figuras de 9 a 14 apresentam o coeficiente de determinação de todas as modelagens estudadas, porém para facilitar a análise dos dados, a Tabela 9 agrupou os coeficientes de determinação das funções polinomiais.

**Tabela 9** – Coeficientes de determinação das equações que relacionam o fluxo de carbono com os índices de vegetação.

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>sPRI<sub>1</sub></b>	<b>sPRI<sub>4</sub></b>	<b>sPRI<sub>12</sub></b>	<b>sPRI<sub>13</sub></b>	<b>NDVI</b>	<b>EVI</b>	<b>EVI2</b>
<b>30 min</b>	<b>MOD09</b>	0,544	0,124	0,151	0,512	0,547	0,527	0,431
	<b>MOD021KM</b>	0,611	0,227	0,059	0,296	0,365	0,380	0,184
<b>1 h</b>	<b>MOD09</b>	0,279	0,109	0,137	0,256	0,278	0,285	0,275
	<b>MOD021KM</b>	0,290	0,145	0,099	0,096	0,195	0,255	0,169
<b>2 h</b>	<b>MOD09</b>	0,137	0,154	0,119	0,128	0,144	0,164	0,085
	<b>MOD021KM</b>	0,162	0,060	0,068	0,063	0,189	0,189	0,144

O melhor ajuste da curva ocorreu para o sPRI<sub>1</sub> ( $R^2 = 0,611$ ) calculado da imagem sem correção atmosférica para 30 minutos, seguido pelo NDVI ( $R^2 = 0,547$ ) e sPRI<sub>1</sub> ( $R^2 = 0,544$ ), ambos para as imagens com correção atmosférica e observações para 30 min. Verifica-se que os melhores resultados foram alcançados para o período mais próximo do momento da passagem do sensor. Em relação ao efeito da correção atmosférica, em geral, existe uma melhora nos resultados dos modelos, com exceção dos índices sPRI<sub>1</sub> e sPRI<sub>4</sub>.

A pesquisa de Garbulsky et al. (2008) testou modelagens para estimar a absorção de carbono para uma floresta mediterrânea período de 2001 a 2005. Foram avaliados para compor a modelagem de absorção de carbono, os índices PRI, NDVI e EVI utilizando produtos MODIS. Durante a maioria dos anos analisados, o PRI obteve o melhor resultado em relação aos outros índices.

Embora não tenha sido abordado neste trabalho, é importante citar que alguns trabalhos observaram uma sensível diferença da correlação do índice PRI com a direção/ângulo da radiação refletida. Drolet et al. (2005) estudando uma floresta boreal durante três anos relacionaram o índice PRI calculado com as imagens diárias do sensor MODIS com a eficiência do uso da luz (calculado com base no fluxo de carbono obtidos das torres micrometeorológicas). É importante citar que as imagens MODIS foram separadas em dois grupos conforme a direção da radiação refletida: retroespalhamento (*backscatter*) e espalhamento (*forward scatter*). Foram testadas as bandas 1, 4, 10, 12 e 13 e encontraram uma forte correlação da banda 13 para as cenas de reflectância ‘*backscatter reflectance scenes*’. Em todos os casos, a relação entre PRI e LUE era quase inexistente quando os dados de todas as imagens MODIS foram utilizadas, sem diferenciação entre retroespalhamento e espalhamento.

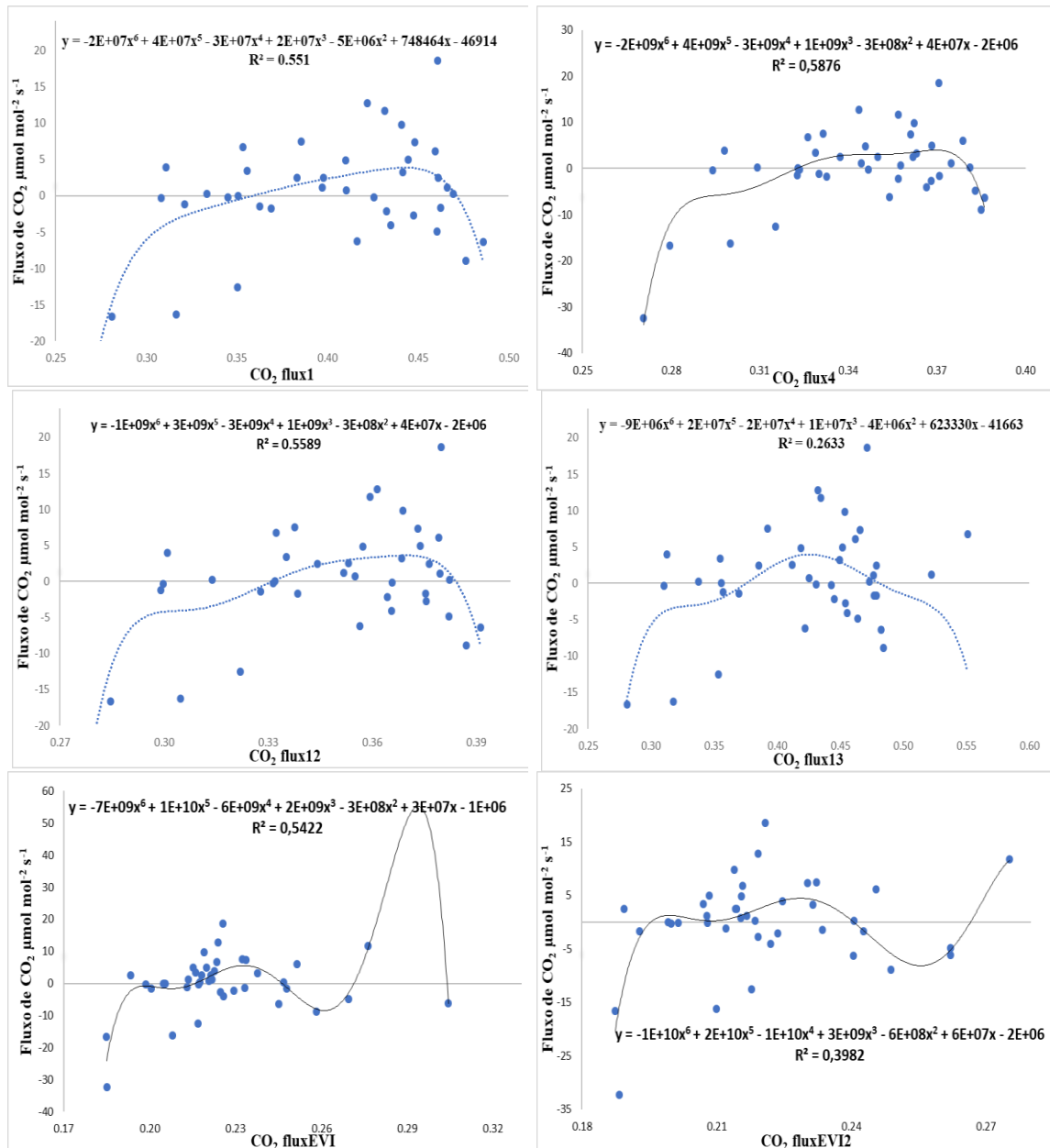
O trabalho de Goerner et al. (2011) abordou de outra maneira a questão da dependência da reflexão sobre as geometrias Sol/sensor. Nesse caso, as imagens MODIS foram separadas em dois grupos, conforme o ângulo de imageamento do

satélite, observações nadir (0-10°) e off-nadir. Os modelos de previsão da LUE com base na relação do PRI e NDVI obtiveram as melhores correlações das observações próximas do nadir do que o outro grupo. Essa diferença é explicada porque ao olhar sob ângulos variados, o satélite pode detectar diferentes porções de copa de árvore e solo, resultando em variação da reflectância da superfície. Assim, florestas densamente vegetadas são menos afetadas pelo ângulo de visada. Outra razão pela qual os dados próximos do nadir podem ter uma melhor correspondência com dados de eficiência do uso da luz é devido ao efeito atmosférico menor em função da distância da superfície terrestre e do satélite ser menor em comparação aos outros ângulos de visada.

#### 4.3.3 Análise do CO<sub>2</sub>flux

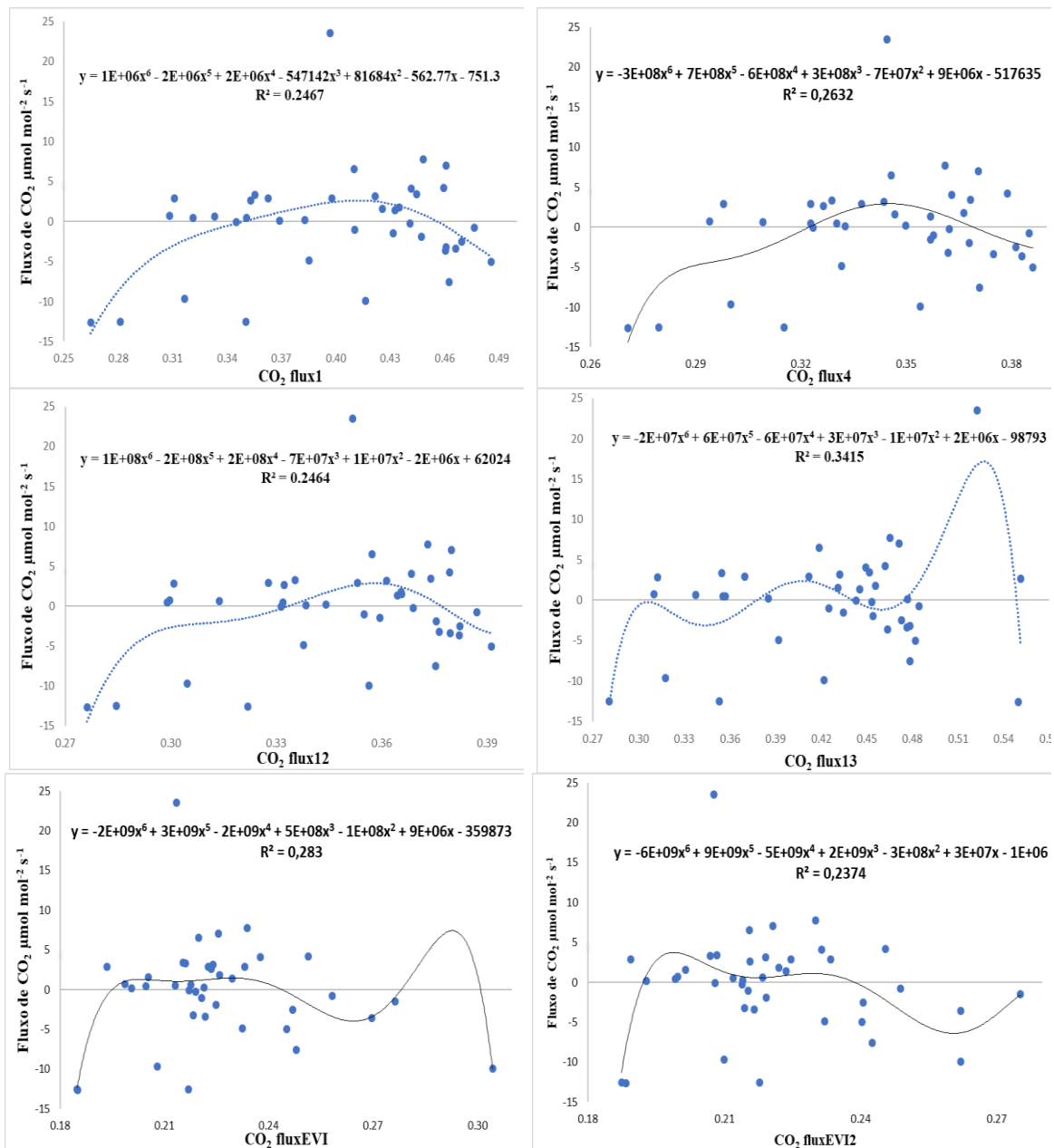
Da mesma forma que foi realizado para os índices de vegetação, utilizou-se a análise de regressão para explicar a relação entre as variáveis, tendo os índices espectrais obtidos pelas imagens de satélite como variável independente (X) e o fluxo de carbono medido em campo como variável dependente (Y). Assim como ocorreu com os índices espectrais, a modelagem do CO<sub>2</sub>flux também não obteve resultados satisfatórios para o modelo de regressão linear. Assim adotou-se o modelo de regressão polinomial.

A análise foi realizada para dois grupos distintos de dados: índices espectrais das imagens com correção atmosférica (MOD09) e índices espectrais sem correção atmosférica (MOD021KM). Para cada grupo, foram testados os modelos com os três períodos de valores de fluxo de carbono: 1) valores de meia hora em torno do momento de passagem do sensor; 2) média de observação de 1 hora em torno do momento de passagem do sensor; e 3) média de observações de 2 horas em torno do momento de passagem do sensor (Figuras 15 a 20).



**Figura 15** - Ajustes do índice  $\text{CO}_2\text{flux1}$ ,  $\text{CO}_2\text{flux4}$ ,  $\text{CO}_2\text{flux12}$ ,  $\text{CO}_2\text{flux13}$ ,  $\text{CO}_2\text{fluxEVI}$  e  $\text{CO}_2\text{fluxEVI2}$  para imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de  $\text{CO}_2$  com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor.

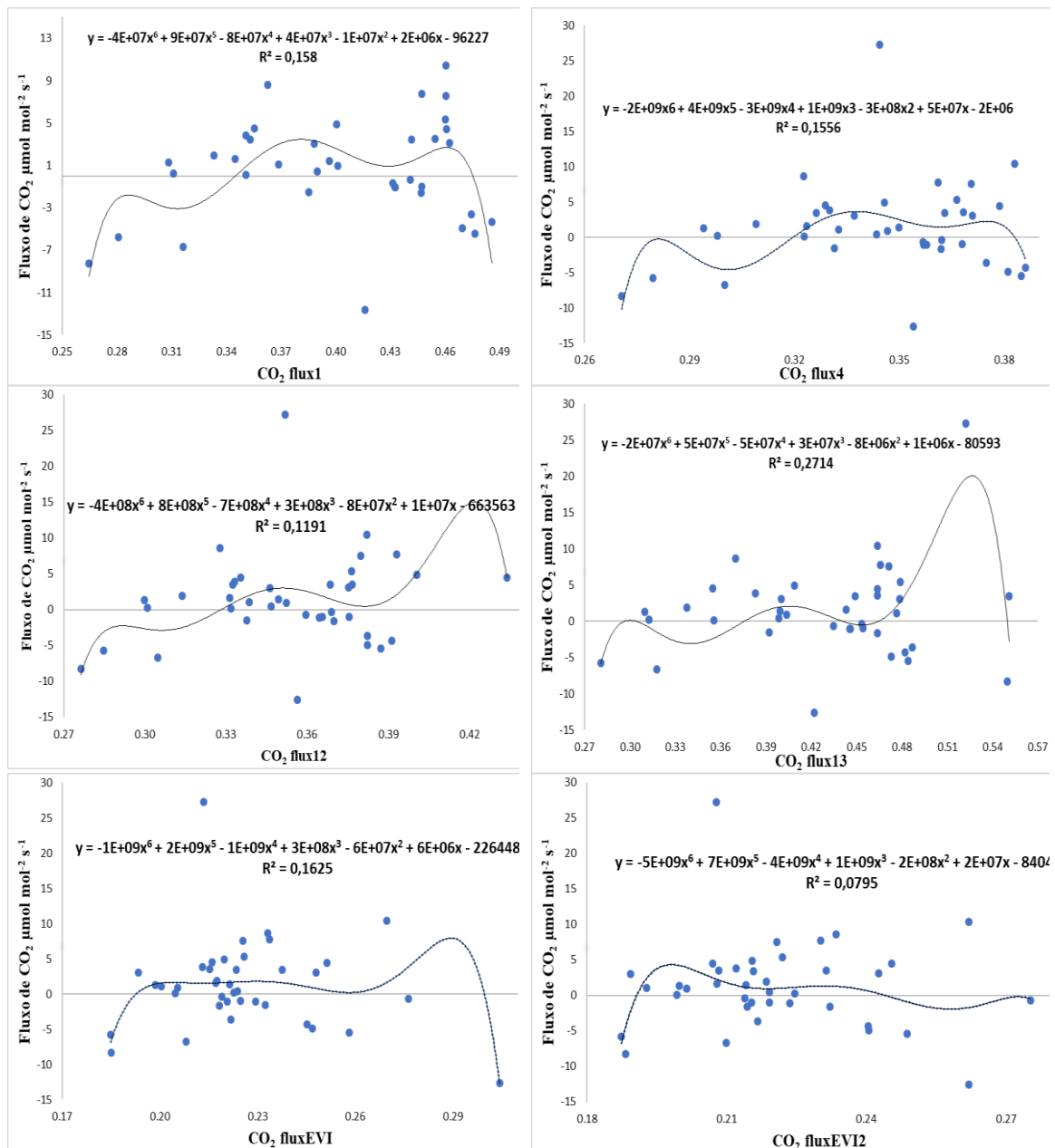
Observa-se na Figura 15, para imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de  $\text{CO}_2$  para observações de meia hora, que as equações geradas obtiveram coeficiente de determinação entre 0,26 e 0,58, respectivamente para o  $\text{CO}_2\text{flux13}$  e  $\text{CO}_2\text{flux4}$ .



**Figura 16** - Ajustes do índice CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub>, CO<sub>2</sub>fluxEVI e CO<sub>2</sub>fluxEVI2 para imagens com correção atmosférica com dados de CO<sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor.

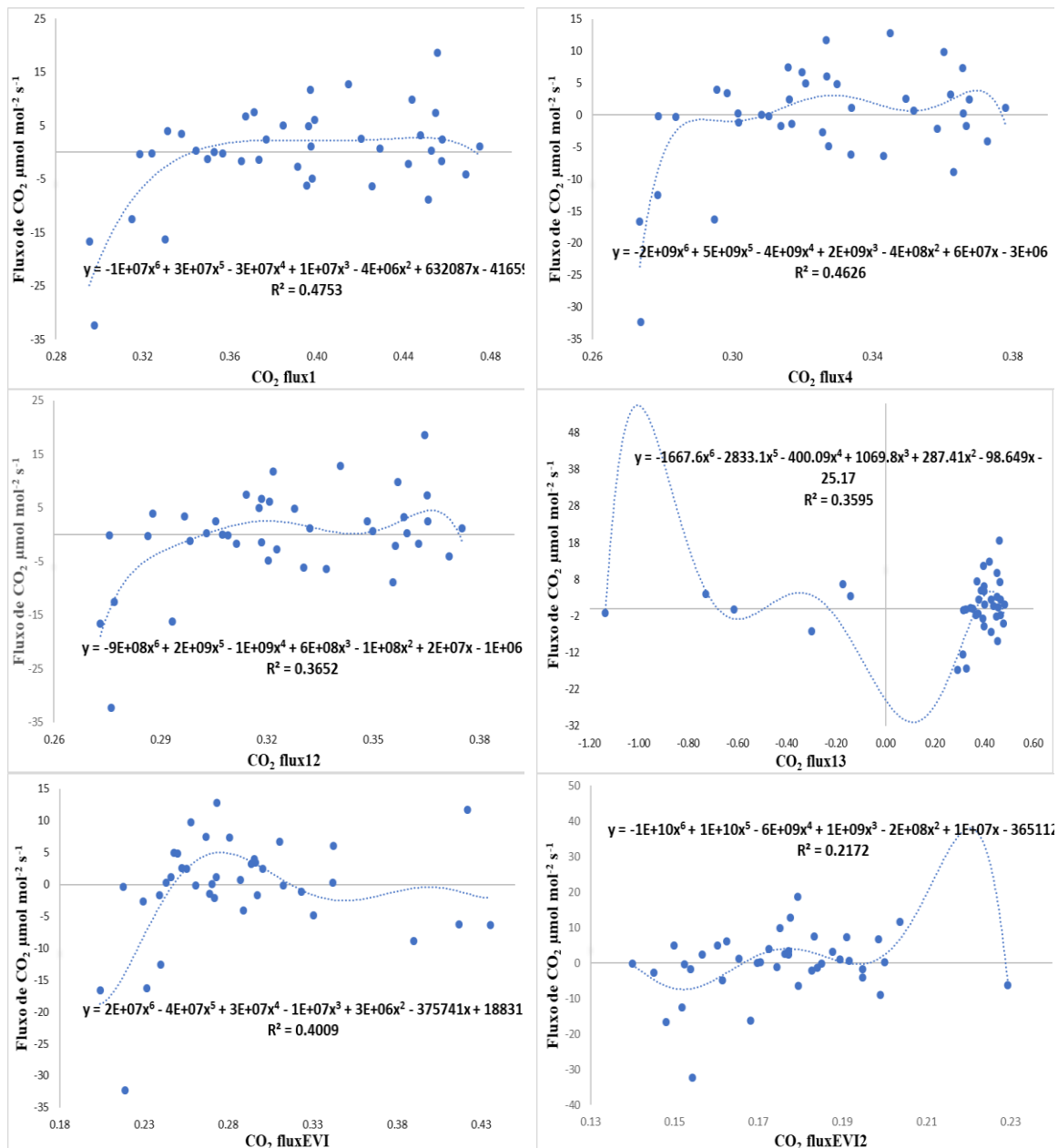
No caso das imagens com correção atmosférica com dados de fluxo de CO<sub>2</sub> para observações de 1 hora, ao contrário do que ocorreu para as observações de meia hora, o CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub> obteve o maior coeficiente de determinação (0,341).





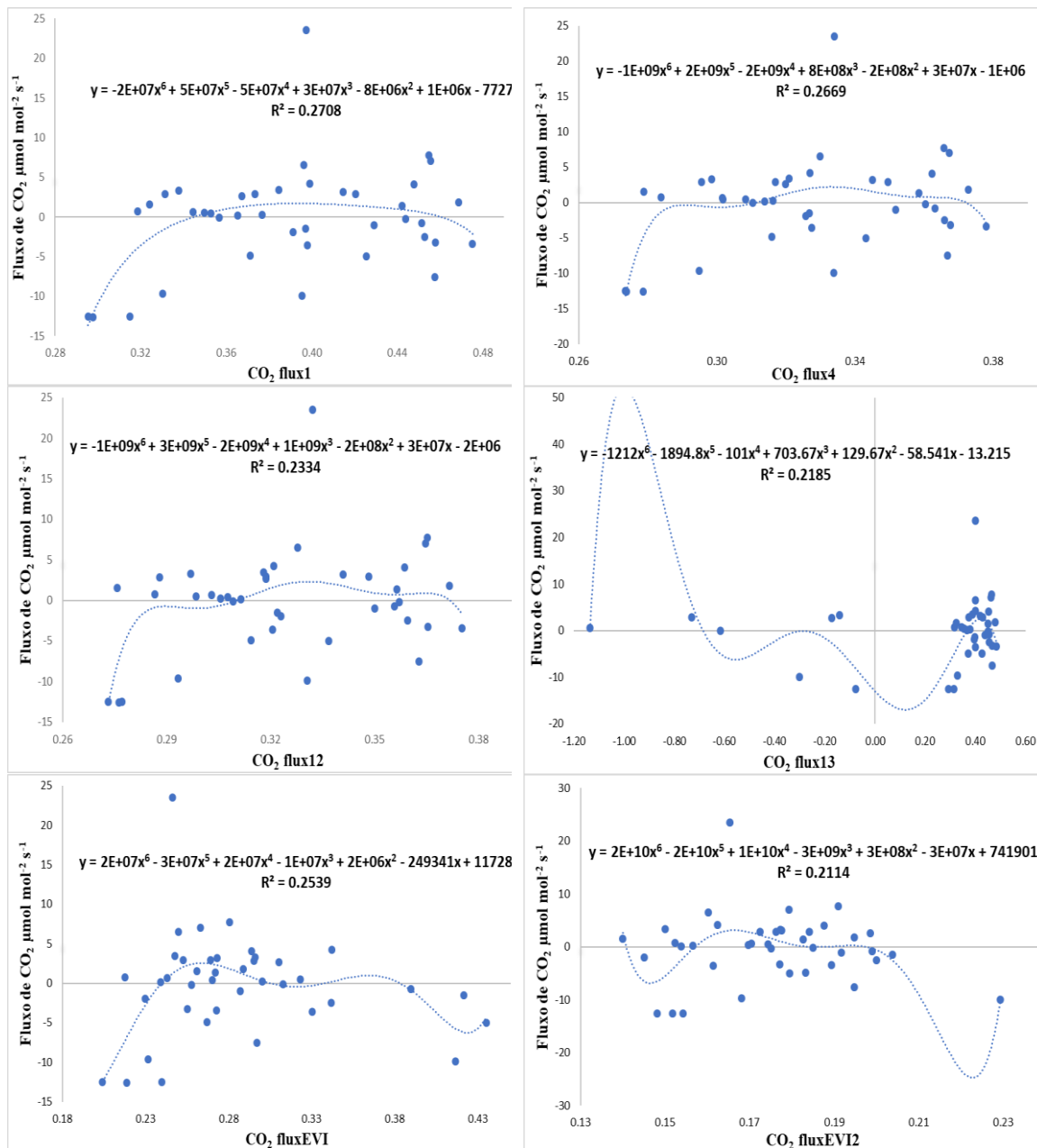
**Figura 17** - Ajuste do índice CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub>, CO<sub>2</sub>fluxEVI, CO<sub>2</sub>fluxEVI2 para imagens com correção atmosférica com dados do fluxo de CO<sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor.

Verifica-se, observando as Figuras 15, 16 e 17 que os coeficientes de determinação foram diminuindo à medida que o tempo de observação média se afasta do momento de passagem do sensor.



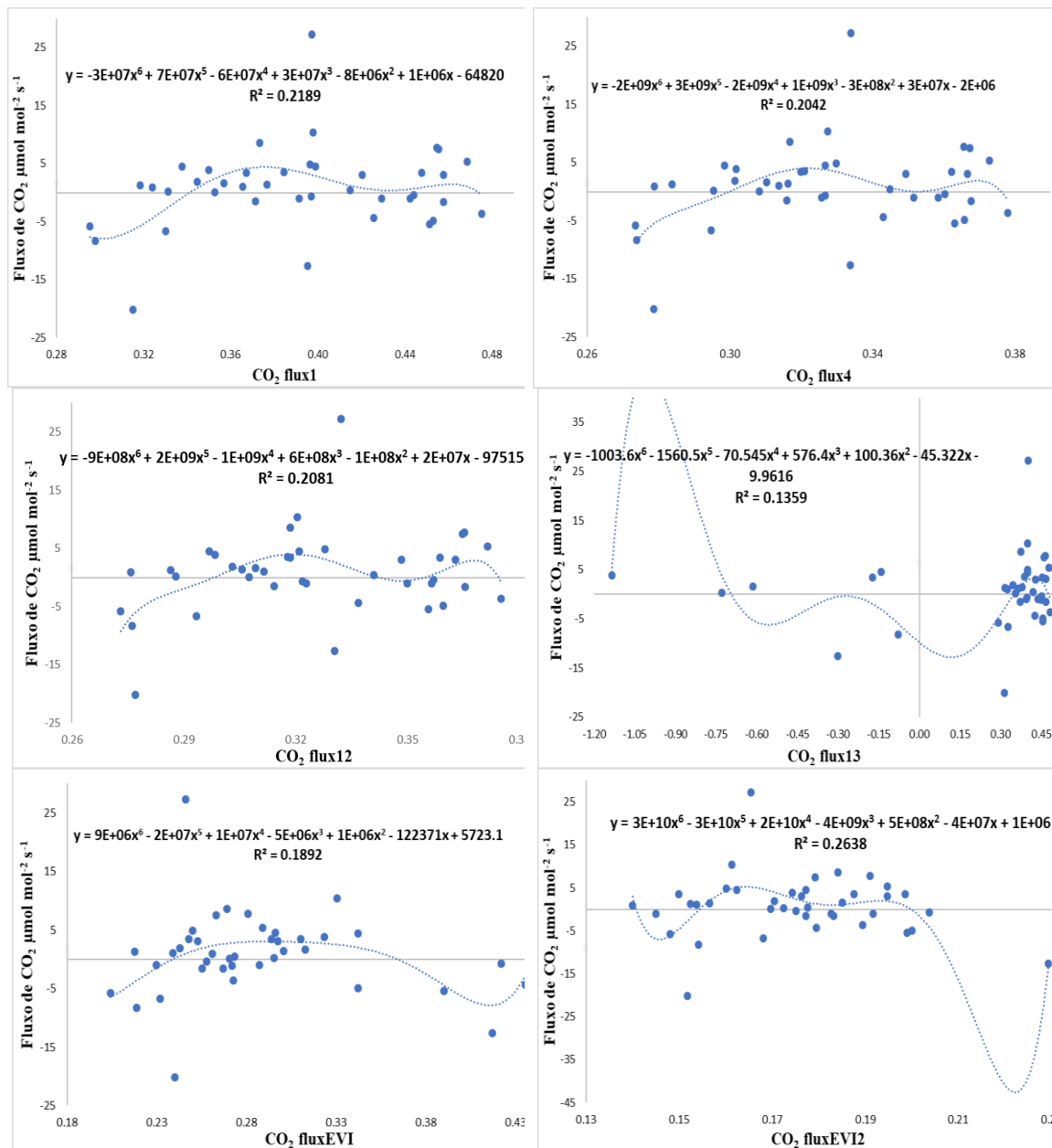
**Figura 18** - Ajustes do índice CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub>, CO<sub>2</sub>fluxEVI, CO<sub>2</sub>fluxEVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados do fluxo de CO<sub>2</sub> com observações na meia hora em torno do momento de passagem do sensor.

Por meio da análise da Figura 18, constatou-se que para as observações de meia hora que todos os coeficientes de determinação aumentaram como resultado da correção atmosférica, com exceção do CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub>.



**Figura 19** - Ajustes do índice CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>EVI</sub> e CO<sub>2</sub>flux<sub>EVI2</sub> para imagens sem correção atmosférica com dados de fluxo de CO<sub>2</sub> com observações de uma hora em torno do momento de passagem do sensor.

Para as imagens sem correção atmosférica com dados de CO<sub>2</sub> com observações de 1 hora foram encontrados valores de coeficientes de determinação em torno de 0,25; sendo o CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub> ligeiramente maior ( $R^2 = 0,271$ ) (Figura 19).



**Figura 20** - Ajustes do índice CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub>, CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub>, CO<sub>2</sub>fluxEVI e CO<sub>2</sub>fluxEVI2 para imagens sem correção atmosférica com dados de fluxo de CO<sub>2</sub> com observações de duas horas em torno do momento de passagem do sensor.

Como visto, as Figuras de 15 a 20 apresentam o coeficiente de determinação de todas as modelagens estudadas, porém para facilitar a análise dos dados, a Tabela 10 agrupou os coeficientes de determinação das funções polinomiais.

**Tabela 10** – Coeficientes de determinação dos modelos de sequestro de carbono.

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub>flux<sub>13</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub>fluxEvi</b>	<b>CO<sub>2</sub>fluxEvi2</b>
<b>30 min</b>	<b>MOD09</b>	0,551	0,588	0,559	0,263	0,542	0,398
	<b>MOD021KM</b>	0,475	0,463	0,365	0,359	0,401	0,217
<b>1 h</b>	<b>MOD09</b>	0,247	0,263	0,246	0,341	0,283	0,237
	<b>MOD021KM</b>	0,271	0,267	0,233	0,218	0,254	0,211
<b>2 h</b>	<b>MOD09</b>	0,158	0,155	0,119	0,271	0,162	0,079
	<b>MOD021KM</b>	0,219	0,204	0,208	0,136	0,189	0,264

O melhor ajuste da curva ocorreu para o CO<sub>2</sub>flux<sub>4</sub> (R<sup>2</sup> = 0,588) calculado da imagem com correção atmosférica para 30 minutos, seguido pelo CO<sub>2</sub>flux<sub>12</sub> (R<sup>2</sup> = 0,559) e CO<sub>2</sub>flux<sub>1</sub> (R<sup>2</sup> = 0,551) para as mesmas condições. Ressalta-se que a banda 4 (0,545 – 0,565 μm) é a banda do MODIS mais próxima da faixa de referência do índice do PRI (0,570 μm), esse resultado evidencia que a utilização da faixa espectral proposta inicialmente para o PRI poderia apresentar melhores resultados na modelagem espectral para essas regiões.

Analisando todas as modelagens obtidas nesse estudo, observa-se que o maior coeficiente de determinação (0,611) foi para o índice sPRI<sub>1</sub> para observações de 30 min sem correção atmosférica. Isso divergiu da pesquisa de Rahman et al. (2000) que apresentou um coeficiente de determinação expressamente maior para CO<sub>2</sub>flux de 0,78, enquanto foi encontrado R<sup>2</sup> de 0,57 para o NDVI e R<sup>2</sup> de 0,4 para o PRI.

Verifica-se que CO<sub>2</sub>flux calculado a partir do NDVI apresentou resultados melhores que o CO<sub>2</sub>flux com o EVI e EVI2, o mesmo foi encontrado por Pedroza da Silva (2014).

Pedroza da Silva (2014) investigou cinco sítios experimentais do LBA com o total de 21 imagens do sensor hiperespectral Hyperian, sendo 2 áreas comuns com o presente trabalho (km 83 e FNS). A modelagem para o CO<sub>2</sub>flux a partir do NDVI obteve R<sup>2</sup> = 0,86. Essa alta correlação pode ser atribuída a alguns fatores: utilização da faixa espectral precisa do índice PRI; mais alta resolução espacial (30 metros); e outra hipótese, é que o pequeno número da amostra, pode auferir uma margem de erro maior para o modelo.

Em áreas de Caatinga, Santos (2017) desenvolveu a modelagem do CO<sub>2</sub>flux apenas com o NDVI e o PRI a partir de 22 cenas do sensor Landsat-8. Apesar do Landsat, assim como o MODIS, não possuir a banda correspondente comprimento de onda de 0,57 μm, o modelo proposto apresentou um bom ajuste para o CO<sub>2</sub>flux com R<sup>2</sup> = 0,82.

Verifica-se que os melhores ajustes foram encontrados para os valores de fluxo de carbono mais próximo do horário de passagem do sensor. Diferentemente, Pedroza da Silva (2014) e Santos (2017) obtiveram modelagens com melhores resultados para as observações médias de duas horas.

As imagens com correção atmosférica apresentaram melhores coeficientes de determinação para todas as observações de 30 min, com exceção para o  $CO_2flux_{13}$ . Não foi possível observar um padrão de comportamento para as observações de 1h e 2h. Dessa forma, sugere-se uma investigação mais detalhada nesse sentido para compreender o efeito da correção atmosférica para o cálculo do sequestro de carbono. Drolet et al. (2005) estudaram a relação do PRI com a eficiência da fotossíntese (relacionada com o fluxo de carbono) para uma floresta boreal e igualmente não encontraram um resultado uniforme para o efeito da correção atmosférica. Foi verificado para a banda 13 que a correção atmosférica melhorou a relação com a LUE, enquanto para as outras bandas testadas não ocorreu aumento no coeficiente de determinação, inclusive para a banda 12, a relação passou de significativa para não significativa.

Durante o período de 30 min, que obteve as melhores correlações, a banda 13 apresentou um valor bem inferior, o desempenho da banda para as outras observações não foi uniforme. Quando se analisa a literatura, verifica-se que não existe um consenso sobre a utilização da banda 13 no cálculo do PRI para estimar a eficiência do uso da luz na fotossíntese. A modelagem de Drolet et al. (2005), obteve o melhor coeficiente de determinação para a banda 13 (0,76). Por outro lado, Goerner et al. (2011) decidiram não incluir a banda 13 em suas análises porque essa tende a saturar sobre o solo.

A banda 13 neste estudo também demonstrou essa tendência de saturação em diversas cenas para a área da FNS. Assim, uma provável explicação para esse comportamento é que durante os períodos de maior estiagem, o pixel apresenta uma maior proporção de solo exposto nas áreas de pastagem. Outra hipótese é que a banda 13 é mais sensível aos gases liberados pelas queimadas, que são mais comuns de ocorrer nas áreas desmatadas. Ressalta-se que se optou por não utilizar essas cenas no trabalho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O potencial dos índices espectrais para mensurar os fatores que envolvem o ciclo do carbono tem sido amplamente estudado para diferentes tipos de vegetações utilizando o método *eddy covariance* presente nas torres micrometeorológicas como forma de validação dos dados. Os modelos obtidos na presente análise apresentaram correlações moderadas entre os fluxos de carbono medidos nos sítios meteorológicos associados com os índices espectrais. O maior coeficiente de determinação (0,6) foi obtido para o índice sPRI originário do produto MOD021KM que disponibiliza imagens sem correção atmosférica e para os dados de fluxo de carbono de 30 minutos mais próximos do horário de passagem do sensor. Esse resultado foi uma exceção, pois predominantemente os melhores ajustes foram obtidos para as imagens com correção atmosférica.

Apesar da modelagem com o índice CO<sub>2</sub>flux não apresentar o melhor ajuste, os coeficientes de determinação foram medianos, próximos do índice sPRI calculado com a banda 1. Dessa forma, ambos podem ser considerados em estudos para estimar o sequestro de carbono com base na variabilidade dos índices de espectrais.

O sensor MODIS possui algumas opções de bandas e produtos *ready-to-use* que possibilitam estimar o sequestro de carbono. A banda mais adequada variou conforme o índice utilizado. Com relação ao CO<sub>2</sub>flux, os melhores ajustes foram apresentados quando se utilizou a banda 4, que é a banda mais próxima a faixa do comprimento de onda sugerido para a fórmula do índice PRI. Contudo, em geral as equações com as outras bandas avaliadas apresentaram coeficientes de determinação similares.

### Sugestões para Trabalhos Futuros

- A literatura apresenta diversos modelos que utilizam outros parâmetros além dos índices de vegetação para estimar o fluxo de carbono, assim novos modelos podem ser avaliados com a inserção de outras variáveis, como dados meteorológicos.

- Na região amazônica, o fluxo de carbono oscila bastante ao longo do dia e em função das alterações sazonais. Dessa forma, séries temporais mais longas podem aprimorar os resultados desse estudo.
- Como diversas bandas do sensor MODIS obtiveram resultados similares para estimar o CO<sub>2</sub>flux, recomenda-se que sejam testados outros sensores que não possuem bandas com o comprimento de onda exato para o cálculo do PRI.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R. G.; RANDOW C. V.; PRIANTE FILHO, N.; MANZI, A. O. AGUIAR, L. J. G.; CARDOSO, F. L. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p. 248-257, 2006.

ANDREAE, M. O.; ACEVEDO, O. C.; ARAÚJO, A.; ARTAXO, P.; BARBOSA, C. G. G.; BARBOSA, H. M. J.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHI, X.; CINTRA, B. B. L.; DA SILVA, N. F.; DIAS, N. L.; DIAS-JÚNIOR, C. Q.; DITAS, F.; DITZ, R.; GODOI, A. F. L.; GODOI, R. H. M.; HEIMANN, M.; HOFFMANN, T.; KESSELMEIER, J.; KÖNEMANN, T.; KRÜGER, M. L.; LAVRIC, J. V.; MANZI, A. O.; LOPES, A. P.; MARTINS, D. L.; MIKHAILOV, E. F.; MORAN-ZULOAGA, D.; NELSON, B. W.; NÖLSCHER, A. C.; SANTOS NOGUEIRA, D.; PIEDADE, B. M. T. F.; PÖHLKER, C.; PÖSCHL, U.; QUESADA, C. A.; RIZZO, L. V.; RO, C. U.; RUCKTESCHLER, N.; SÁ, L. D. A.; DE OLIVEIRA SÁ, M.; SALES, C. B.; DOS SANTOS, R. M. N.; SATURNO, J.; SCHÖNGART, J.; SÖRGEL, M.; DE SOUZA, C. M.; SOUZA, R. A. F.; SU, H.; TARGHETTA, N.; TÓTA, J.; TREBS, I.; TRUMBORE, A. S.; VAN EIJK, A.; WALTER, D.; WANG, Z.; WEBER, B.; WILLIAMS, J.; WINDERLICH, J.; WITTMANN, F.; WOLFF, S.; YÁÑEZ-SERRANO, A. M. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosol. **Atmospheric Chemistry Physics**, v. 15, p. 10723–10776, 2015.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. **Sensor MODIS: Uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE-10131-RPQ/752, 2003.

ARTAXO, P.; RIZZO, L. V.; PAIXÃO, M.; LUCCA, S.; OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.; WIEDEMANN, K. T.; ANDREAE, M. O.; HOLBEN, B.; SCHAFER, J.; CORREIA, A. L.; PAULIQUEVIS, T. M. Aerosol Particles in Amazonia: Their composition, role in the radiation balance, cloud formation, and nutrient cycles. In: KELLER, M.; M. BUSTAMANTE, J.; GASH, P.; DIAS, P. S. (Eds.). **Amazonia and Global Change**. Washington, D. C.: Geophys. Monogr. Ser., p. 233-250, 2009.

ARTAXO, P.; DIAS, M. A. F. S.; NAGY, L.; LUIZÃO, F. J.; CUNHA, H. B.; QUESADA, C. A. N.; MARENGO, J. A.; KRUSCHE, A. Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o funcionamento da Floresta Amazônica. **Ciência e Cultura**, v. 66, n. 33, 2014.

BAPTISTA, G. M. M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION. In: XI SBSR, 2003, Belo Horizonte. Brasil. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1037-1044.

BAPTISTA, G. M. M.; MUNHOZ, C. B. R. Comportamento do sequestro florestal de carbono, do conteúdo de CO<sub>2</sub> atmosférico e do conteúdo de umidade da vegetação no Pantanal de Nhecolândia, MS, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. In:

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1071-1078.

BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v.15, n.7, p.709–717, 2011.

BORGES, E. F. **Discriminação e caracterização fenológica de classes de cobertura vegetal natural e antrópica do Oeste da Bahia a partir de séries temporais do sensor MODIS**. 138p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. Vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 241-252, 1997.

CARVALHO, A. A.; BAPTISTA, G. M. M. Influência da correção atmosférica na conversão dos dados de radiância para reflectância para o cálculo do EVI em imagem RapidEye. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 67/7, p. 1371-1390, Nov/Dez/2015.

COUTO JUNIOR, A. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A., MARTINS, E., SANTANA, O. A.; SOUZA, V.; ENCINA, J. I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 699-705, 2011.

COOPS, N. C.; HILKER, T.; HALL, F. G.; NICHOL, C. J., DROLET, G. G. Estimation of light-use efficiency of terrestrial ecosystems from space: A status report. **BioScience**, v. 60, n.10, p. 788–797, 2010.

DROLET, G. G.; HUENRICH, K. F.; HALL, F. G.; MIDDLETON, E. M.; BLACK, T. A.; BARR, A. G.; MARGOLIS, H. 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.

DUVEILLER, G.; LOZANO, R. L.; CESCATTI, A. Exploiting the multi-angularity of the MODIS temporal signal to identify spatially homogeneous vegetation cover: A demonstration for agricultural monitoring applications. **Remote Sensing of Environment** v. 166, p. 61–77, 2015.

EDUARDO, B. F. S.; MACHADO E SILVA, A. J. F. Avaliação da influência da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação NDVI em imagens Landsat 5 e RapidEye. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013. **Anais**. São José dos Campos: INPE. p. 1442 – 1449.

EL-MARSI, B.; BARMAN, R.; MEIYAPPAN, P.; SONG, Y.; LIANG, M.; JAIN, A. K. Carbon dynamics in the Amazonian Basin: Integration of eddy covariance and

ecophysiological data with data with a land surface model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182 – 183, p. 156 – 167, 2013.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MACHADO, E. L. M. Análise da composição florística e fitossociológica da Floresta Nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazonica**, v.35, n. 2, p. 155 -173, 2005.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ANTUNES, J. F. G.; ANDRADE, J. C. Desenvolvimento do banco de produtos MODIS na base estadual brasileira. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE. **Anais**. p.7596.

ESQUERDO, J. C. D. M.; COUTINHO, A. C.; ANTUNES, J. F. G. Uso combinado de dados NDVI/MODIS dos satélites Terra e Aqua no monitoramento multitemporal de áreas agrícolas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – XVI SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. **Anais**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0759.pdf>. Acesso em: 18/09/2016.

FIELD, A. **Descobrimo a estatística usando o SPSS [recurso eletrônico]**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009, 687p.

FIRMINO, M. J. A. C. **Testes de hipóteses: uma abordagem não paramétrica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Matemática). Universidade de Lisboa, Lisboa. 2015. 99 p.

FRANÇA, L. H.; CORTES, M. R. **A temática ambiental e o processo educativo: o ensino de física a partir de temas controversos**. Disponível em: [www.ebah.com.br/content/ABAAAhP4cAJ/slides-a-tematica-ambiental-processo-educativo-ensino-fisica-a-partir-temas-controversos](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAhP4cAJ/slides-a-tematica-ambiental-processo-educativo-ensino-fisica-a-partir-temas-controversos). Acesso em 20/12/2017.

FRIEND, A. D.; LUCHT, W.; RADEMACHER, T. T.; KERIBIN, R.; BETTS, R.; CADULE, P.; CIAIS, P.; CLARK, D. B.; DANKERS, R.; FALLOON, P. D.; ITO, A.; KAHANA, R.; KLEIDON, A.; LOMAS, M. R.; NISHINA, K.; OSTBERG, S.; PAVLICK, R.; PEYLIN, P.; SCHAPHOFF, S.; VUICHARD, N.; WARSZAWSKI, L.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, F. I. Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, p. 3280-3285, 2014.

GARBULSKY, M. N. F.; PEÑUELAS, J.; PAPAIE, D.; FILELLA, I. Remote estimation of carbon dioxide uptake by a Mediterranean forest. **Global Change Biology**, v. 14, p. 2860–2867, 2008.

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; BILGER, W.; BJÖRKMAN, O.; FREDEEN, A. L.; PEÑUELAS, J. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. **Oecologia**, v. 85, p. 1-7, 1990.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, p. 35–44, 1992.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologica**, v.112, p. 492 - 501, 1997.

GINCIENE, B. R.; BITENCOURT, B. R. Utilização do EVI (Enhanced Vegetation Index) para maior sensibilidade na detecção de mudanças temporais em fragmentos de floresta estacional semidecidual. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011. **Anais**. São José dos Campos: INPE. p.1620.

GOERNER, A; REICHSTEIN, M; TOMELLERI, E; HANAN, N; RAMBAL, S; PAPAIE, D; DRAGONI, D; SCHMULLIUS, C. Remote sensing of ecosystem light use efficiency with MODIS-based PRI. **Biogeosciences**, v.8, n.1, p. 189-202, 2011.

GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p. 229 – 244, 2008.

GOULDEN, M. L.; MILLER, C. D.; ROCHA, H. R.; MENTON, M. C.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. M. S.; SOUSA, C. A. D. Diel and seasonal patterns of tropical forest CO<sub>2</sub> exchange. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 42-54, 2004.

HERRMANN, V.; FREITAS, S. R. Atmospheric CO<sub>2</sub> budget over the Amazon basin: The role of convective systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, p. 529 - 540, 2011.

HUETE, A.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. J. D. A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. 2004. **Plano de Manejo da Floresta Nacional do Tapajós**. IBAMA, Belterra, Pará. 373 p.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Plano de Manejo da Reserva Biológica do Jarú**. Resumo Executivo, Brasília, DF, 2010. 37 p.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/flonatapajos/guia-do-visitante>. Acesso em: 20/12/2017.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p. 2014.

JENKINS, J. P.; RICHARDSON, A. D.; BRASWELL, B. H.; OLLINGER, S. V.; HOLLINGER, D. Y.; SMITH, M. L. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurement. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.143, p. 64–79, 2007.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 3 ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 598p.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; KIM, Y.; DIDAN, K. 2-band enhanced vegetation index without a blue band and its application to AVHRR data. **The International Society for Optical Engineering (Proceedings of SPIE)**, v. 6679, 2007.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and products status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p.3-15, 2002.

KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; VON RANDOW, C.; ARAÚJO, A. C.; OLIVEIRA, P. J.; CULF, A.; MANZI, A. O.; NOBRE, A. D.; KABAT, P.; MOORS, E. J. The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon Rain Forest conditions. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, Supplement, p. 101 –113, 2004.

LBA - LARGE SCALE BIOSPHERE - ATMOSPHERE EXPERIMENT IN AMAZONIA. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA / Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. **Plano Científico – LB2**. 2007. Disponível em: lba.inpa.gov.br. Acesso em: maio de 2016.

LBA - LARGE SCALE BIOSPHERE - ATMOSPHERE EXPERIMENT IN AMAZONIA. Disponível em: <http://lba2.inpa.gov.br/index.php/torres.html>. [2017]. Acesso em: junho de 2017.

LAROSE, D. T. **Discovering Statistics**. 2 ed. W.H. Freeman, 2013. 673 p.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; JÚNIOR O. A. C. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, v.6, n.1, p. 91-121, 2003.

LIU, H. Q.; HUETE, A. R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, p. 457–465, 1995.

LUIZÃO, F. O Projeto cenários para a Amazônia: programas associados, metas e síntese de atuação. In: EMILIO, T.; LUIZÃO, F. (Org.). **Cenários para a Amazônia: clima, biodiversidade e uso da terra**. Manaus: Editora INPA, p.7-15, 2014.

LUYSSAERT, S.; INGLIMA, I.; JUNG, M.; RICHARDSON, A. D.; REICHSTEIN, M.; PAPALE, D.; PIAO, S. L.; SCHULZE, E.-D.; WINGATE, L.; MATTEUCCI, G.; ARAGAO, L.; AUBINET, M.; BEER, C.; BERNHOFER, C.; BLACK, K. G.; BONAL, D.; BONNEFOND, J.-M.; CHAMBERS, J.; CIAIS, P.; COOK, B.; DAVIS, K. J.; DOLMAN, A. J.; GIELEN, B.; GOULDEN, M.; GRACE, J.; GRANIER, A.; GRELLE, A.; GRIFFIS, T.; GRUNWALD, T.; GUIDOLOTTI, G.; HANSON, P. J.; HARDING, R.; HOLLINGER, D. Y.; HUTYRA, L. R.; KOLARI, P.; KRUIJT, B.; KUTSCH, W.; LAGERGREN, F.; LAURILA, T.; LAW, B. E.; LEMAIRE, G.; LINDROTH, A.; LOUSTAU, D.; MALHI, Y.; MATEUS, J.; MIGLIAVACCA, M.; MISSON, L.; MONTAGNANI, L.; MONCRIEFF, J.; MOORS, E.; MUNGER, J. W.; NIKINMAA, E.; OLLINGER, S. V.; PITA, G.; REBMANN, C.; ROUPSARD, O.; SAIGUSA, N.; SANZ, M. J.; SEUFER, G.; SIERRA, C.; SMITH, M.-L.; TANG, J.; VALENTINI, R.; VESALA T.; JANSSENS, I. A. CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. **Global Change Biology**, v. 13, p. 2509–2537, 2007.

MAJEROWICZ, N. Fotossíntese. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S. A., 2004, p.114-178.

MALHI, Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. **Journal of Ecology**, v. 100, p. 65–75, 2012.

MIDDLETON, E. M.; CHENG, Y.; HILKER, T.; T. BLACK, A.; KRISHNAN, P.; COOPS, N. C.; HUENNRICH, K. F. Linking foliage spectral responses to canopy-level ecosystem photosynthetic light-use efficiency at a Douglas-fir forest in Canada. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 2, p. 166–188, 2009.

NACHAR, N. The Mann-Whitney U: A test for assessing whether two independent samples come from the sample distribution. **Tutorials in Quantitative Methods for Psychology**, v, 4, n. 1, p.13-20, 2008.

NASA. Level 1B Software System Overview. [2017]. Disponível em: <https://mcst.gsfc.nasa.gov/11b/software-system-overview>. Acesso em: 10/04/2018.

OLIVEIRA, G. **Modelagem do balanço de energia e evapotranspiração na Amazônia brasileira com uso de imagens MODIS e ASTER**. 2012. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 227p. 2012.

OLIVEIRA, P. P. A. Gases de efeito estufa em sistemas de produção animal brasileiros e a importância do balanço de carbono para a preservação ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, número especial do IV SMUD, p. 623-634, 2015.

OLIVEIRA, P. J.; FISCH, G. Perfil de vento em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 31, n.4, p. 581-595, 2001.

OLIVEIRA, M.; MORAES, E. C. Validação do balanço de radiação obtido a partir de dados MODIS/TERRA na Amazônia com medidas de superfície do LBA. **Acta Amazonica**, v. 43, n.3, p. 353 – 364, 2013.

OLOFSSON, P.; LAGERGREN, F.; LINDROTH, A.; LINDSTRÖM, J.; KLEMEDTSSON, L.; EKLUNDH, L. Towards operational remote sensing of forest carbon balance across Northern Europe. **Biogeosciences Discussions**, v. 4, p. 3143–3193, 2007.

OMETTO, J. P. H. B.; NOBRE, A. D.; ROCHA, H. R.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A. Amazonia and the modern carbon cycle: lessons learned. **Oecologia**, v. 143, n. 4, p. 483-500, 2005.

PEDROZA DA SILVA, S. C. **Modelagem espectral para determinação da concentração e fluxo de CO<sub>2</sub> em paisagens naturais e antrópicas na região amazônica**. 2014. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. 173p.

PEDROZA DA SILVA, S. C.; BAPTISTA, G. M. Variações na modelagem do sequestro florestal de carbono por meio de dados hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, **Anais**. São José dos Campos: INPE, p. 9020- 9027.

PEREIRA, O. A.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. S.; SEIXA, G. B.; ARRUDA, P. H. Z. Determinação do fluxo de CO<sub>2</sub> no Norte do Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, p. 341 - 351, 2013.

PINTO, L. D. V. O. **Fluxos de energia sobre uma floresta tropical na Amazônia**. 2003. Dissertação (Mestrado em meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 62p.

PHILLIPS, O. L.; BRIENEN, R. J. W. Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations carbon emissions. **Carbon Balance and Management**, v. 12, n. 1, 2017.

PONZONI, F. J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETO, J. S. (Eds). **Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília: UNB/EMBRAPA, 2001.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. 1. ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007.

POTTER, C.; KLOOSTER, S.; HUETE, A.; GENOVESE, V.; BUSTAMANTE, M.; GUIMARÃES FERREIRA, L.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; ZEPP, R. Terrestrial carbon sinks in the Brazilian Amazon and Cerrado region predicted from MODIS satellite data and ecosystem modeling. **Biogeosciences Discussions**, 6, 947–969, 2009.

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO<sub>2</sub> flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS Workshop. Proceedings. **Anais**. JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.

RAHMAN, A.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D. A.; PRENTISS, D. Modeling distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 579-591, 2001.

RICE, A. H.; PYLE, E. H.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. PALACE, M.; KELLER, M.; CAMARGO, P. B.; PORTILHO, K.; ARQUES, D. F. M.; WOFSEY, S. C. Carbon balance and vegetation dynamics in an old-growth Amazonian Forest. **Ecological Applications**, v. 14, n.4, p. 55-71, 2004.

ROCHA, A. V.; SHAVER, G. R. Advantages of a two band EVI derived from solar and photosynthetically active radiation fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1560-1563, 2009.

RODRIGUES, C. P.; FONTANA, D. C.; MORAES, O. L. L.; ROBERT, D. R. NDVI e fluxo de CO<sub>2</sub> em lavoura de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.1, p. 95 -104, 2013.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, p. 309-317, 1973.

SALESKA, S. R.; MILLER, S. D.; MATROSS, D. M.; GOULDEN, M. L.; WOFSEY, S. C.; DA ROCHA, H. R.; DE CAMARGO, P. B.; CRILL, P.; DAUBE, B. C.; DE FREITAS, H. C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; J. MUNGER, W.; PYLE, E. H.; RICE, A. H.; SILVA, H. Carbon in Amazon Forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, v. 302, p. 1554 – 1557, 2003.

SALESKA, S. R.; ROCHA, H.; KRUIJT, B.; NOBRE, A. Fluxos de carbono do ecossistema e metabolismo da Floresta Amazônica. **Geophysical Monograph Series**, v. 186, p. 389-407, 2009.

SANCHES, I. D.; ANDRADE, R. G.; QUARTAROLI, C. F.; RODRIGUES, C. A. G. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011. **Anais**. São José dos Campos: INPE, p.7564.

SANTOS, C. V. B. **Modelagem espectral para determinação de fluxo de CO<sub>2</sub> em áreas de Caatinga preservada e em regeneração**. 2017. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, 2017. 75p.

SILVA JÚNIOR, R. S.; MOURA, M. A. L.; MEIXNER, F. X.; KORMANN, R.; LYRA, R. F. F.; FILHO, M. F. N. Estudo da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico em área de pastagem na Região Amazônica. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 3, p. 259-270, 2004.



SKINNER, R. H.; WYLIE, B. K.; GILMANOV, T. G. Using normalized difference vegetation index to estimate carbon fluxes from small rotationally grazed pastures. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 4, p. 972 – 978, 2011.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e Descrição. In: RUDORF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.). **O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Ed. Parêntese, 2007. cap. 1, p. 3-21.

TANG, X.; LIUA, D.; SONGA, K.; MUNGER, J. W.; ZHANGA, B.; WANGA, Z. A new model of net ecosystem carbon exchange for the deciduous-dominated forest by integrating MODIS and flux data. **Ecological Engineering**, v. 37, p. 1567–1571, 2011.

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista HCPA**, v. 32, n. 2, p. 227-234, 2012.

VIEIRA, E. L.; SOUZA, G. S.; SANTOS, A. R.; SANTOS SILVA, J. **Manual de Fisiologia Vegetal**. São Luís: EDUFMA, 2010. 186p.

VOURLITIS, G. L.; FILHO, N. P.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. S.; RAITER, F.; HOEGEL, W.; CAMPELO, J. H. J. Effects of meteorological variations on the CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian transitional tropical forest. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, Supplement, p. 89–100, 2004.

WAGNER, F. H.; HERAULT, B.; BONAL, D.; STAHL, C.; ANDERSON, L. O. et al. Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. **Biogeosciences**, v. 13, n.8, p. 2537-2562, 2016.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Statement on the status of the global climate in 2015**. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/rest/bitstreams/11935/retrieve>. Acesso em: 02 de nov. 2016.

WOLFE, R. E.; NISHIHAMA, M.; FLEIG, A. J.; KUYPER, J. A.; ROY, D. P.; STOREY, J. C.; PATT, F. S. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p.31-49, 2002.

YAN, W.; HU, Z.; ZHAO, Y.; ZHANG, X.; FAN, Y.; SHI, P.; HE, Y.; YU, G.; LI, Y. Modeling net ecosystem carbon exchange of alpine grasslands with a satellite-driven model. **Plos One**, v. 10, n. 4, 2015.