

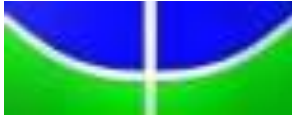
Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas

**MODELAGEM ESPECTRAL PARA DETERMINAÇÃO DA
CONCENTRAÇÃO E FLUXO DE CO₂ EM PAISAGENS NATURAIS
E ANTRÓPICAS NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Suzy Cristina Pedroza da Silva

Tese de Doutorado n. 22

Brasília-DF
Dezembro de 2014



**Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas**

MODELAGEM ESPECTRAL PARA DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO E FLUXO DE CO₂ EM PAISAGENS NATURAIS E ANTRÓPICAS NA REGIÃO AMAZÔNICA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília-UnB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Geociências Aplicadas.

Área de Concentração: Geoprocessamento Aplicado à Análise Ambiental

Suzy Cristina Pedroza da Silva

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista
Orientador

Brasília-DF
Dezembro de 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Orientador/IGD/UnB)
Presidente da Banca

Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi (Eng.Florestal/UnB)
Examinador Externo

Profa. Dra. Danielle Barros Ferreira (INMET/DF)
Examinador Externo

Prof. Dr. Edson Eyji Sano (IGD/UnB)
Examinador Interno

Prof. Dr. Ricardo Seixas Brites (IGD/UnB)
Examinador Interno

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1019234.

S586m Silva, Suzy Cristina Pedroza da.
Modelagem espectral para determinação da concentração e fluxo de CO₂ em paisagens naturais e antrópicas na Região Amazônica / Suzy Cristina Pedroza da Silva. -- 2014.
xv, 173 f. : il. ; 30 cm.
Tese (doutorado) - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, 2014.
Inclui bibliografia.
Orientação: Gustavo Macedo de Mello Baptista.
1. Dióxido de carbono. 2. Sensoriamento remoto.
3. Amazônia - Brasil. I. Baptista, Gustavo Macedo de Mello.
II. Título.

CDU 502.3(811)

Dedicatória

Dedico esta tese ao meu companheiro Cloves e ao meu filho Pedro Pedroza Pereira, que me acompanharam nessa incrível jornada, em um lugar perto e, ao mesmo tempo, distante de minha casa. Houve momentos difíceis, árduos, tensos e de provação, mas compreendia que, por causa deles, eu não poderia desistir daquilo que eu voluntariamente me propunha a fazer e que muito ansiava alcançar.

Agradecimentos

Ao meu Deus, por me dar todas as oportunidades de crescer e ter o conforto espiritual nos momentos mais tensos, propiciando-me uma vida saudável e alegre.

À minha mãe Val, que amo muito, por toda sua dedicação e ao meu pai de coração Almeida, pelo carinho, estímulo e apoio incondicional aos meus estudos. Às minhas duas irmãs Michelle e Deyse que são grandes amigas nessa minha vida, nas quais encontro inspiração e ao mesmo tempo descontração para escrever.

Em memória ao meu pai, Rogério, e meu avô Daki, que descansem em paz, agradeço por todos os momentos felizes de minha infância. E à minha avó Letice, aos meus tios, tias e primos.

Aos meus professores da UFAM, Teca Fraxe e Julio Tello, que tenho com muito carinho, ambos foram meus orientadores em diferentes etapas da minha vida acadêmica, e mais que professores e orientadores, hoje os considero como verdadeiros amigos.

Em especial a Joana D'Arc Ribeiro, minha primeira orientadora (BIPIC-UFAM) na vida acadêmica, que faleceu em 2006 na tragédia com avião da GOL.

Aos meus amigos, que nunca esqueço e que sempre me apoiaram, Zulma, Duka, José França, Ângela, Liene, Ana Claudia Nogueira, Shirley Abreu, João Lizardo Paixão, Luiz, Altemir, Eliene Cruz, Mônica Suani, Sissi Mikaela, e tantos outros. Às minhas grandes amigas da UNB e sempre, Elane, Eluzai e Izabel.

Ao meu amigo e orientador, professor Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista, que me guiou, orientou, mesmo a distância e me norteou no decorrer de todo esse trabalho, sempre me incentivando e, acima de tudo, acreditando na minha capacidade intelectual para conclusão desse estudo.

Em especial, e com muito carinho, ao pesquisador Dr. Edson Sano (Coordenador do IBAMA), que me acolheu na UnB e me compreendeu e me ajudou nessa jornada.

Aos professores e pesquisadores, Paulo Meneses, Tati de Almeida, Ricardo Brites e Edson Sano pela colaboração no trabalho, nas bancas de qualificação e de acompanhamento.

Aos professores do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial do Instituto de Geociências – UnB, pelo apoio para processamento dos dados.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, da Universidade de Brasília (UnB), pela oportunidade para minha qualificação profissional.

Ao INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) e pelo Programa LBA, pelo Apoio Logístico, Infraestrutura para atividades de campo e pelo uso dos dados das Torres de Medição do Fluxo de CO₂, em especial ao Dr. Antônio O. Manzi (Coordenação Geral LBA), Veber Moura e Leila Leal.

Ao prof. Dr. Fernando Cardoso (Universidade de Rondônia – Campus de Ji-Paraná) e pesquisador Bruno Castro, pela disponibilização das informações e acompanhamento no campo com apoio logístico do IBAMA.

Ao prof. Dr. Prof. Humberto Rocha, responsável pelo Laboratório de Clima e Biosfera - DCA-IAG-USP e pesquisadora Emília M S Brasilio.

E à FAPEAM, pelo incentivo através de recursos financeiros para a realização deste trabalho.

RESUMO

A modelagem espectral é uma das ferramentas importantes para a determinação de estimativa de parâmetros biofísicos de um local. Correlacionar a concentração e o fluxo de dióxido de carbono, por meio de medições indiretas é um grande avanço na área das geociências, principalmente quando envolve, também, a análise de ambientes naturais e antropogênicos. O objetivo central da tese foi analisar a concentração e o fluxo de dióxido de carbono por meio do sensoriamento remoto hiperespectral em determinadas regiões da Amazônia, verificando-se o potencial das imagens do sensor Hyperion para detecção do sequestro florestal de carbono e do conteúdo de CO₂ atmosférico. O estudo foi desenvolvido a partir de cinco sítios experimentais com as torres micrometeorológicas, em diferentes paisagens na Amazônia Brasileira. A metodologia foi desenvolvida a partir da modelagem do CO₂flux que mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação, a partir da integração do NDVI, EVI e EVI com o sPRI e validada pelo índice, ICO₂, que é determinado pela intensidade da feição de absorção do gás centrada em 2,0 μm. Neste estudo foram utilizadas 21 imagens hiperespectrais obtidas pelo sensor Hyperion que possui cenas com 242 bandas, nos comprimentos de onda de 0,4 a 2,5 μm, com uma resolução espacial de 30 metros. Resultados desse estudo apontaram que os índices NDVI, EVI e EVI2 podem compor a estrutura do índice de sequestro florestal de carbono, CO₂flux. Entretanto, fez-se necessário avaliar a potencialidade e comparação dos índices em relação à detecção do sequestro florestal de carbono, associado as medições diretas de CO₂ nas torres. Essa avaliação fez referência às relações estatísticas entre as informações obtidas com a aplicação do modelo CO₂flux e as informações de campo da concentração (ppm) e fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂. Assim, os resultados mostraram que o CO₂flux pode ser utilizado tanto com dados de concentração, quanto com dados de fluxo. Os melhores ajustes para o CO₂flux pontual foram apresentados para a associação com dados de fluxo, enquanto que, para as análises a partir do *footprint*, apresentou melhores resultados com a associação entre os dados espectrais com as medidas de concentração de CO₂ no topo das torres. As correlações entre as variáveis mensuradas são inversamente proporcionais, indicando maior atividade fotossintética medida pelo CO₂flux, quando a concentração é menor na camada atmosférica. O índice ICO₂ mostrou-se muito eficiente na validação do modelo de sequestro florestal de carbono, além de apresentar melhor ajustamento para dados de fluxo no pixel, apresentando correlação positiva indicando que, à medida que aumenta o fluxo de CO₂ na coluna do ar atmosférico, também, eleva-se os valores de ICO₂ nas imagens do sensor Hyperion, e, expõe que 71% do fluxo de CO₂ são explicados pelo teor de CO₂ disponível na coluna atmosférica nos ambientes estudados. Contudo, as medições indiretas da concentração de CO₂ podem ser monitoradas por meio de sensoriamento remoto hiperespectral e permitem a compreensão de sua dinâmica, baseando-se nas modelagens espectrais de vegetação.

Palavras-Chave: Amazônia Brasileira, CO₂flux, ICO₂, imagens hiperespectrais, Hyperion.

ABSTRACT

The spectral modeling is an important tool for determining biophysical parameters estimation of a location. Correlating the concentration and the carbon dioxide stream by means of indirect measurements is a large advance in the field of earth sciences, especially when it also involves the analysis of natural and anthropogenic environments. The central aim of the thesis was to analyze the concentration and carbon dioxide flow through the hyperspectral remote sensing in certain regions of the Amazon, verifying the potential of images Hyperion sensor for the detection of forest carbon sink and CO₂ content atmospheric. The study was developed from five experimental sites with micrometeorological towers in different landscapes in the Brazilian Amazon. The methodology was developed from modeling CO₂flux which measures the efficiency of carbon sink process by vegetation, from the integration of NDVI, EVI and EVI with sPRI and validated by the index, ICO₂, which is determined by the intensity of the feature a gas absorption centered at 2.0 microns. This study used 21 images taken by the Hyperion hyperspectral sensor which has 242 scenes with bands at wavelengths from 0.4 to 2.5 microns, with a spatial resolution of 30 meters. Results of this study showed that the NDVI indices, EVI and EVI2 can compose the structure of the forest sink rate of carbon, CO₂flux. However, it was necessary to evaluate the potential and comparison of ratios in relation to detection of forest carbon sink associated direct measurements of CO₂ in the towers. This assessment referred to the statistical relationships between the information obtained from the application of CO₂flux model and the concentration camp information (ppm) and flux (mol.m⁻².s⁻¹) of CO₂. Thus, the results showed that the CO₂flux can be used both with concentration data, and with data stream. The best settings for the timely CO₂flux were presented to the association with flux data, while for the analyzes from the footprint, showed better results with the association between the spectral data with the CO₂ concentration measurements at the top of the towers. The correlations between the variables measured are inversely proportional, indicating increased activity photosynthetic measured by CO₂flux, when the concentration is lower in the atmospheric layer. The ICO₂ index proved to be very effective in validating the forest carbon sequestration model and showed better adjustment to the flow of pixel data, displaying a positive correlation indicating that, as it increases the flow of CO₂ in atmospheric air column, also rises the ICO₂ values in Hyperion images, and states that 71% of the CO₂ stream are explained by CO₂ content available on column in the study sites. However, the indirect measurements of CO₂ concentration can be monitored by means of hyperspectral remote sensing and allow the understanding of its dynamics, based on spectral modeling of vegetation.

Key words: Brazilian Amazon, CO₂flux, ICO₂, hyperspectral images, Hyperion.

LISTA DE FIGURAS

Figura II-1. Efeito estufa resultante da absorção de luz infravermelha de comprimento de onda longo pelo CO ₂ e outros gases na atmosfera.	30
Figura II-2. Concentração de CO ₂ em ppm de 1960 a 2010.	31
Figura II-3. Anatomia de corte transversal de uma folha.....	34
Figura II-4. Curva espectral de uma folha verde.	35
Figura II-5. Satélite EO-1 em órbita.	46
Figura II-6. Sensor Hyperion Imaging Spectrometer - a) vista lateral esquerda, b) vista lateral direita e c) vista posterior.	47
Figura II-7. Cubo espectral de uma imagem do sensor Hyperion correspondente à imagem da torre K67 (2003 233) de 21 de agosto de 2003.....	49
Figura III-1. Amazônia Brasileira.....	58
Figura III-2. Formações vegetais e sua relação com o relevo.....	60
Figura III-3. Localização das cinco torres micrometeorológicas do Programa LBA.....	65
Figura III-4. Torre K34 do Programa LBA. a) acesso pela rodovia BR-174; b) e c) ramal de barro, a cerca de 34 km da Reserva; d) placa da Reserva Experimental do INPA; e) e f) acesso de 2,5km pela floresta para base da torre; g) torre K34 com 55 metros de altura; h) dossel da floresta primária; i) alojamento da Reserva.....	67
Figura III-5. Vista e instrumentos posicionados na parte superior da torre k83, FLONA Tapajós.	69
Figura III-6. Torre K67 do Programa LBA. a) vista da torre K67 com 64m de altura; b) sub- bosque da floresta vista de cima; c) vista do dossel da floresta e d) sala climatizada com equipamentos.	69
Figura III-7. Torre FNS do Programa LBA. a) vista da torre FNS com 8 metros de altura; b e c) vista do ambiente de pastagem que circunda a torre.....	70
Figura III-8. Áreas de Pastagens, nas proximidades da Torre FNS.	71
Figura III-9. Torre SIN, localizada no sítio experimental da UFMT em Sinop (MT).	72
Figura III-10. Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, nos arredores da Torre K34.....	74
Figura III-11. Esquema de uma área de tensão ecológica - contato Floresta Ombrófila/Floresta Estacional.	75
Figura III-12. Área de manejo florestal em uma Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, dentro da FLONA Tapajós.	78
Figura III-13. Fluxograma do método e técnicas de pesquisa utilizados no estudo.	80
Figura III-14. Detalhes do comportamento espectral da vegetação em uma cena do sensor Hyperion....	81

Figura III-15. Localizações das posições antiga e atual da Torre JAR (Reserva Biológica do Jarú).....	82
Figura III-16. Torre JAR do Programa LBA. a) estrada de acesso à torre; b) acesso pelo rio Jarú; c) trilha de 1500m; d) base da torre e equipamentos; e) torre JAR com 62 metros de altura e f) vista do dossel da floresta densa.....	83
Figura III-17. Distribuição continental das torres de fluxos das redes regionais, formando a rede global de fluxos.....	86
Figura III-18. Anemômetro Vector para medição de velocidade de vento e placa solar instalados nas torres.....	88
Figura III-19. Analisador de gás infravermelho, instalados nas torres K34 e FNS.....	88
Figura III-20. Frequência da distribuição do vento e percurso do fluxo (m) para: a) torre K34, b) torre FNS, c) torre K83 e d) torre K67.	92
Figura III-21. <i>Footprint</i> das torres K34, K67 e FNS.	93
Figura III-22. Intensidade da feição espectral do CO ₂ atmosférico, obtido cena do sensor Hyperion.	99
Figura IV-1. Ciclo diário da concentração média de CO ₂ em diferentes ambientes naturais e antropogênicos na Amazônia Brasileira.....	104
Figura IV-2. Ciclo diário do fluxo médio de CO ₂ em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira.....	105
Figura IV-3. Flutuação dos dados, a cada uma hora e duas horas: a) concentração e b) fluxo de CO ₂	106
Figura IV-4. Espectros de reflectância de um pixel de vegetação extraído de uma cena do sensor Hyperion após correção atmosférica pelo método FLAASH.	108
Figura IV-5. Comportamento dos autovalores da imagem 2001 307 (VNIR), referente à localização da torre k83 em Santarém-PA.....	109
Figura IV-6. Degradação do sinal ao longo das componentes MNF da imagem 2001 307, referente à localização da torre k83 em Santarém-PA.	112
Figura IV-7. Índice de Vegetação NDVI de uma imagem Hyperion na torre K67, 2002 269: a) composição colorida e b) imagem NDVI.	115
Figura IV-8. Comportamento dos índices de vegetação NDVI, EVI e EVI2 do sensor Hyperion, coincidentes com os dados disponíveis das torres micrometeorológicas.....	119
Figura IV-9. Relação entre os índices de vegetação EVI e EVI2.....	120
Figura IV-10. Relação linear entre os índices de vegetação NDVI com os índices a) EVI e b) EVI2.....	121
Figura IV-11. Ajustes dos modelos CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2, com a concentração (ppm) ao longo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.....	124
Figura IV-12. Ajustes do CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2 com a concentração (ppm) no topo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.	125

Figura IV-13. Ajustes do CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 1 hora.	126
Figura IV-14. Ajustes do CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 2 horas.	127
Figura IV-15. Ajustes do <i>footprint</i> aos modelos CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2, com a concentração (ppm) ao longo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.	134
Figura IV-16. Ajustes do <i>footprint</i> aos modelos CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2 com a concentração (ppm) no topo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.	135
Figura IV-17. Ajustes do <i>footprint</i> aos modelos CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 1 hora.	136
Figura IV-18. Ajustes do <i>footprint</i> aos modelos CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 2 horas.	137
Figura IV-19. Regressão linear entre os dados de CO ₂ flux e ICO ₂	142
Figura IV-20. Cena de uma imagem Hyperion da Torre FNS: a) Imagem CO ₂ flux e b) imagem ICO ₂	143
Figura IV-21. Análise do ICO ₂ a partir da concentração de CO ₂ (ppm).	144
Figura IV-22. Análise do ICO ₂ a partir do fluxo de CO ₂ (mol.m ⁻² .s ⁻¹).	144
Figura IV-23. Validação dos valores estimados do CO ₂ flux, a partir da análise pontual e footprint com dados de concentração e fluxo de CO ₂	146
Figura IV-24. Validação dos valores estimados do ICO ₂ , a partir da análise pontual e footprint com dados de concentração e fluxo de CO ₂	147

LISTA DE TABELAS

Tabela II-1. Composição da atmosfera em volume de massa e concentração.....	28
Tabela II-2. Principais pigmentos encontrados nas folhas.....	39
Tabela II-3. Características do sensor Hyperion.....	48
Tabela III-1. Torres de Fluxo de CO ₂ na Amazônia Brasileira.....	65
Tabela III-2. Universo amostral e características das imagens Hyperion.....	84
Tabela III-3. Variáveis da estação automática AWS (<i>Automatic Weather Station</i>) e do Sistema Edd (<i>Eddy Correlation System</i>), nas torres em estudo.....	87
Tabela III-4. Cobertura espectral do Hyperion.....	96
Tabela III-5. Avaliação qualitativa da correlação.....	101
Tabela IV-1. Autovalores e percentual de variância da imagem 2001 307 (k83), para as primeiras 8 e 18 componentes das bandas VNIR e SWIR.....	110
Tabela IV-2. Parâmetros das imagens Hyperion registradas.....	113
Tabela IV-3. Valores de NDVI para os pontos das torres.....	116
Tabela IV-4. Estatística descritiva para os índices NDVI, EVI e EVI2.....	118
Tabela IV-5. Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk.....	122
Tabela IV-6. Correlação de Spearman (r_s).....	129
Tabela IV-7. Resultados da Correlação Canônica.....	130
Tabela IV-8. Matriz de Correlação entre os dois grupos (variáveis espectrais e medição direta).....	130
Tabela IV-9. Teste U de similaridade.....	132
Tabela IV-10. Área (ha) do <i>footprint</i> das torres micrometeorológicas.....	133
Tabela IV-11. Correlação de Spearman (r_s) - <i>Footprint</i>	138
Tabela IV-12. Resultados da Correlação Canônica - <i>Footprint</i>	139
Tabela IV-13. Matriz de Correlação entre os dois grupos (variáveis espectrais e medição direta) - <i>Footprint</i>	139
Tabela IV-14. Teste U de similaridade - <i>Footprint</i>	140
Tabela IV-15. Teste de Normalidade para Análise de Validação.....	147
Tabela IV-16. Teste de Similaridade do CO ₂ flux para Análise de Validação.....	148
Tabela IV-17. Teste de Similaridade do ICO ₂ para Análise de Validação.....	148

Tabela IV-18. Matriz de Correlação de Canônica para os dados de ICO_2	148
Tabela IV-19. Validação do modelo de sequestro florestal de carbono, com dados de concentração (ppm) pelo ICO_2	149

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Principais Índices de Vegetação Encontrados na Literatura.....	166
Anexo B. Principais sensores hiperespectrais orbitais e aerotransportados.....	171

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

AC	Acre
AM	Amazonas
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
B	Biomassa
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager
CO ₂ flux	Índice de eficiência do processo de sequestro de carbono
CRI	Índice de carotenóides
EO-1	Earth Observing One
EVI	Enhanced Vegetation Index
EVI-2	Enhanced Vegetation Index
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
Footprint	Área de influência das Torres
GEE	Gás Efeito Estufa
GO	Goiás
GOSAT	Greenhouse Gases Observing Satellite
GVI	Green Vegetation Index
Hymap	Hymap Airborne Hyperspectral Scanner
HyspIRI	Hyperspectral Infrared Imager
IAF	Índice de área foliar
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis
ICO ₂	Teor de CO ₂ na coluna do ar atmosférico
IFOV	Instantaneous Field of View
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRGA	Infrared gas analyzers
JAXA	Agência de Exploração Aeroespacial do Japão
JPL/NASA	Jet Propulsion Laboratory
LBA	Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia)
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MNF	Fração Mínima de Ruído (Minimum Noise Fraction)
MOE	Ministério do Meio Ambiente do Japão
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Índice de água por diferença normalizada
NIES	Instituto Nacional de Estudos Ambientais do Japão
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OCO	Orbiting Carbon Observatory
OCO-2	Orbiting Carbon Observatory

PA	Pará
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
PHI	Pushbroom Hyperspectral Imager
PPI	Pixel Purity Index
PRI	Índice de reflectância fotoquímica
PVI	Perpendicular Vegetation Index
R Canônico	Correlação Canônica
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
RFAAb	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
RMS	Erro médio quadrático
RO	Rondônia
ROI	Region Of Interest
r_s	Correlação de Spearman
RVI	Ration Vegetation Index
SAVI	Soil Ajusted Vegetation Index
SBI	Soil Brightness Index
sPRI	Índice de reflectância fotoquímica, reescalonado para valores positivos
SR	Simple Ratio
SVM	Support Vector Machine
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
UC	Unidades de Conservação
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
UnB	Universidade de Brasília
USGS	United States Geological Survey
VNIR	Visível e infravermelho próximo
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index

SÍMBOLOS

A	Argônio
C	Carbono
C F	Fluxo de CO ₂
CFC	Clorofluorcarbono
CH ₄	Metano
cm	Centímetro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Gt	Giga tonelada
Gt. de C	Giga tonelada de carbono
H	Hidrogênio
H ₂ O	Água / Vapor d' Água
ha	Hectare
He	Hélio
HFC	Hidrofluorcarbono

km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
Kr	Criptônio
m	Metros
mm	Milímetros
mm	Milímetro
n	Tamanho da amostra
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
Ne	Neônio
NEE	Troca líquida de dióxido de carbono no ecossistema
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
°C	Graus Celsius
Pg	Pentagrama
ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
R ²	Coefficiente de determinação
s	Segundo
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SO ₂	Dióxido de Enxofre
T	Tonelada
u	Velocidade horizontal do vento a leste
u *	Velocidade de fricção do ar
v	Velocidade horizontal do vento a norte
W	Watt
w	Velocidade vertical do vento
w'	Flutuações da velocidade vertical do vento em relação à média
μmol	Micromol
μmol m ⁻² .s ⁻¹	Micromol por metros e segundos

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	20
Apresentação.....	20
Problematização da Pesquisa.....	23
Originalidade da Pesquisa	24
Hipótese	25
Objetivos	25
Estrutura da Tese.....	26
II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
Dióxido de Carbono	27
Dióxido de carbono e sua relação com a floresta	32
Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.....	33
Sensoriamento Remoto Hiperespectral	42
Sensor Hyperion e Aplicações com Índices de Vegetação	46
Índices de Vegetação e Aplicações com Dados Hyperion	50
III. MATERIAL E MÉTODOS	58
Caracterização da área de estudo	58
Sítios Experimentais.....	62
Tipos de Ambientes e Fitofisionomia dos Sítios Experimentais.....	72
Métodos e Tipo de Pesquisa	79
Universo Amostral e Aquisição das Imagens do Sensor Hyperion	81
Aquisição dos Dados Micrometeorológicos.....	85
Pré-Processamento de Imagens Digitais do Sensor Hyperion	93
Processamento de Imagens Digitais do Sensor Hyperion.....	96
Análise Estatística.....	100
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
Medições Diretas de Concentração e Fluxo de CO ₂	102
Modelagem Hiperespectral do Sequestro Florestal de Carbono	106
Determinação do CO ₂ flux a partir dos índices NDVI, EVI e EVI2	114
Análise pontual do sequestro florestal de carbono com CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2	122
Análise espacial (<i>footprint</i>) do sequestro florestal de carbono com CO ₂ flux, CO ₂ fluxEVI e CO ₂ fluxEVI2	133
Validação da Modelagem do Sequestro Florestal de Carbono	142
V. CONCLUSÕES	150
Sugestões para Trabalhos Futuros	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
ANEXOS	165

I. Introdução

Apresentação

A evolução dos debates sobre a interação entre a biosfera-atmosfera e o fluxo de carbono tem colocado, na pauta das discussões, as possibilidades de conciliar o sensoriamento remoto hiperespectral, a partir de estimativa de parâmetros biofísicos com a concentração e o fluxo de dióxido de carbono (CO₂) na Amazônia Brasileira.

De acordo com Totten (1999), as florestas armazenam dois terços do carbono terrestre, quase um trilhão de toneladas. Há um certo consenso quanto à importância das florestas como referências de sumidouros de armazenamento de mais longa duração no ciclo do carbono. Sob a influência das florestas, o carbono é preso na madeira e acumulado no solo por centenas de anos, antes de ser devolvido para a atmosfera através da respiração, decomposição e queima.

Diante desse quadro, fica patente a importância das funções ecológicas das florestas tropicais que são consideradas ecossistemas terrestres de maior biodiversidade do planeta, responsáveis por uma variedade de espécies vegetais, tanto em gênero, quanto em número. Almeida et al. (1996) sugerem que a variação microclimática dentro da floresta, devido aos fatores resultante da variação temporal e espacial da qualidade e quantidade de luz incidente, poderia ser um dos fatores responsáveis pela determinação da composição das espécies.

Essa situação pode ser bem caracterizada quando se analisam as florestas tropicais da Amazônia, que representam as maiores reservas de florestas contínuas, concentrando 25% das florestas remanescentes do planeta, além de armazenar, em média, 40% do carbono existente na vegetação (MALHI et al., 1998). Além disso, as florestas são responsáveis por, aproximadamente, metade da produção primária bruta de CO₂ (MALHI; GRACE, 2000). Sob a ótica do CO₂, as florestas tropicais são concebidas como ecossistemas complexos, capazes de fornecer uma multiplicidade de contribuições para o clima, pois regulam os processos de emissão ou retenção de gases e de evapotranspiração. Por outro lado, as florestas têm contribuído, também, com o fornecimento de vapor de água, e de possibilitar o sequestro do CO₂ da atmosfera (AGUIAR et al., 2006).

As pesquisas que têm sido desenvolvidas para compreender os efeitos das mudanças da cobertura terrestre são concernentes aos ciclos biogeoquímicos (PEREIRA, 2009). GALLON et al. (2006) apontam que a interação biosfera-atmosfera e fluxo de carbono permitem que se avalie o funcionamento dos ecossistemas, em relação ao uso do solo, à variabilidade climática e ao aumento de concentração de CO₂. Saleska et al. (2003) apresentam dados emitidos sobre o comportamento do CO₂ nas torres de fluxo na Floresta Amazônica. As medições do CO₂ realizadas por meio do método covariância turbulentas estimaram que a emissão líquida de CO₂ à atmosfera varia sazonalmente. Desta forma, ocorre uma diminuição da emissão líquida de CO₂, durante a estação chuvosa, e uma adição na estação seca.

O grande avanço foi a integração do conhecimento técnico-científico do sensoriamento remoto aplicado aos estudos florestais. Tal aproximação é concernente à estimativa de parâmetros biofísicos e fisiológicos da vegetação de forma não destrutiva (SOUZA, 2009). Essa integração implica não só uma nova concepção em relação à capacidade de capturar o fluxo de CO₂ em uma ampla área geográfica na Amazônia Brasileira, mas também a possibilidade das repetidas medições de uma mesma área. Compatibilizar e articular essa fonte de dados constitui importante contribuição para os estudos da dinâmica atmosférica e características da superfície terrestre (DONOGHUE, 2002).

Não obstante o avanço técnico-científico do sensoriamento remoto aplicado aos estudos florestais, pesquisas têm sido desenvolvidas para testar a viabilidade de satélites adequados para medir as concentrações de CO₂ na atmosfera. Em 23 de janeiro de 2009, o Ministério do Meio Ambiente (MOE), o Instituto Nacional de Estudos Ambientais (NIES) e a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) lançaram o satélite GOSAT (*Greenhouse Gases Observing Satellite*), a partir do espaço em escala mundial, determinando sua distribuição global, fontes e sumidouros de gases e relacionando-os de acordo com as épocas, anos e locais (GOSAT PROJECT, 2014). Em 24 de fevereiro de 2009, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lançou o satélite OCO (*Orbiting Carbon Observatory*) para estudar o CO₂ atmosférico, entretanto não obteve êxito no seu lançamento, pois não conseguiu atingir a órbita. Em 02 de julho de 2014, a NASA colocou em órbita o satélite OCO-2, que pretende coletar medições de CO₂ em ciclos anuais e sazonais de cada ano, na órbita sol-síncrona (JPL, 2014).

A questão central dessa tese, e que a diferencia dos demais trabalhos já realizados sobre sensoriamento remoto aplicado aos estudos florestais, consiste, portanto, em utilizar o sensoriamento remoto hiperespectral e a validação das informações sobre a concentração e fluxo de CO₂ em paisagens naturais e antrópicas na Amazônia Brasileira.

Atualmente, com o avanço do sensoriamento remoto caracterizado pelos sensores hiperespectrais e novas técnicas de processamento de imagens, é possível analisar os alvos de superfície não só com base em características espaciais, mas também por meio de suas curvas espectrais discretizadas pixel a pixel obtidas ao longo do espectro óptico refletido.

Além disto, análises quantitativas são normalmente utilizadas para encontrar uma relação entre os parâmetros do alvo e sua reflectância espectral, onde são empregados os índices de vegetação. Esses índices permitem avaliar os indicadores das formações vegetais, tais como crescimento e vigor e podem ser utilizados para diagnosticar diversos parâmetros biofísicos, como o índice de área foliar, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade (PONZONI, 2001).

Essa situação pode ser bem caracterizada quando se pressupõe que o CO₂ pode ser medido, tanto nas paisagens naturais, quanto nas áreas antropizadas da Floresta Amazônica. O CO₂ pode ser medido diretamente nas florestas por meio de técnicas meteorológicas. Também pode ser medido de forma indireta, a partir da análise espectral da vegetação, por meio dos índices de vegetação como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Esse índice de vegetação foi utilizado e validado em diversas pesquisas desde a década de 1970.

Alguns estudos apresentaram resultados satisfatórios para estimar a biomassa, o estoque e sequestro de carbono em ambientes florestais, a partir da utilização dos índices espectrais de vegetação, CO₂flux. O precursor desses estudos foram os trabalhos realizados por Rahman et al. (2000, 2001), que propuseram a integração do índice de vegetação por diferença normalizada, NDVI (ROUSE et al., 1973) que representa o vigor da vegetação fotossinteticamente ativa e o índice de reflectância fotoquímica, PRI (*Photochemical Reflectance Index*, desenvolvido por GAMON et al., 1979) que representa a eficiência do uso da luz na fotossíntese, sendo assim possível integrar as feições de absorção decorrentes do sequestro florestal de carbono, denominando de CO₂flux.

Nesse sentido, o desafio é a grande variação nos valores de fluxos de CO₂ medidos em cada local, o que exige longas séries de dados para a obtenção de resultados conclusivos. Assim, é preciso proceder à pesquisa com séries temporais mais longas, gerando

entendimentos dos processos biológicos mais amplos nas construções dos modelos de balanço de carbono e de energia válidos para a Floresta Amazônica (AGUIAR et al., 2006) e outros biomas.

Enfim, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto para a compreensão da dinâmica e obtenção de fluxo de CO₂ pela vegetação é imprescindível no monitoramento ambiental, principalmente, levando em consideração o tamanho da floresta (hectare) que se pretende alcançar e os problemas inerentes à Amazônia Brasileira, sobretudo, o acesso às florestas, inacessíveis em determinadas épocas do ano (variação sazonal) e pelos altos custos de logísticas de campo, quando essas áreas são acessadas somente com a abertura de trilhas. Em função de sua importância para a pauta científica sobre interação biosfera atmosfera e fluxo de carbono, o presente trabalho procurou, através de um esforço teórico convalidar a modelagem do conteúdo de CO₂ por meio do sensoriamento remoto hiperespectral em determinadas regiões da Amazônia.

Problematização da Pesquisa

As interações globais mais importantes que ocorrem entre a biosfera e a atmosfera são as transferências de energia, água e carbono (MAHLI et al., 1998). Há uma contínua troca de CO₂ entre os seres vivo e a atmosfera, respiração e fotossíntese, materiais da crosta, combustão e oxidação e os oceanos. Cerca 90% da matéria que formam os vegetais são formados no processo fotossintético pela absorção do CO₂ extraído da atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2006). A magnitude desses processos varia de bioma para bioma, porém, os maiores fluxos de CO₂ ocorrem nas florestas tropicais (MAHLI et al., 1998), que acumulam grande quantidade de material orgânico por unidade de área (ANDRAE, 1978).

As principais técnicas utilizadas para verificar as estimativas de CO₂ fazem uso de analisador de gás infravermelho, usando o método de covariância dos vórtices turbulentos na atmosfera, instalados nas torres micrometeorológicas do Programa LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*).

Mais recentemente, os sensores hiperespectrais, que possuem alta dimensionalidade espectral, vêm sendo utilizados na detecção do estresse hídrico, no monitoramento da fisiologia e na delimitação de modelos de carbono nas florestas tropicais (ASNER et al., 2004). Esses sensores permitem a detecção do sequestro florestal de carbono associada às

áreas antropizadas, aglomerados urbanos, florestas nativas, áreas desflorestadas, aberturas de estradas vicinais.

A maior dificuldade na área de geociências é validar os dados de alta resolução espectral com os dados de campo, quando esses dados não são disponíveis ao público. Neste estudo, os dados de concentração e fluxo de CO₂ são coletados e aferidos diariamente nos escritórios do LBA. No presente estudo, essas duas grandezas de uma mesma informação foram vinculadas e validadas a partir do conteúdo de CO₂, possível de ser detectado em dados de radiância, na coluna de ar adjacente aos alvos, por meio do índice espectral, ICO₂, desenvolvido por Baptista (2004).

Dessa forma, nesta pesquisa, buscou-se a detecção do sequestro florestal de carbono, a partir de medições remotas, com uso de imagens gratuitas, mas também possibilitou validar as rotinas de processamento realizadas, com as medições contínuas das torres micrometeorológicas do programa LBA/INPA. A validação dos índices espectrais pode ajudar a compreender a dinâmica do ciclo do carbono em áreas desprovidas de torres de medição, contempladas por imagens hiperespectrais. Dentro de dois anos, a NASA pretende colocar em órbita o sistema sensor HypsIRI (*Hyperspectral Infrared Imager*) que terá sensores hiperespectral e termal para monitoramento ambiental, que recobrirá o planeta a cada 19 dias, e a investigação do comportamento do fluxo de carbono poderá ser realizada.

Originalidade da Pesquisa

Neste estudo, verificou-se a eficiência do índice espectral (CO₂flux) com a integração do NDVI e sPRI, adotando-se também os índices de vegetação, como o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e EVI2 (*Enhanced Vegetation Index - 2*), para estimar o sequestro florestal de carbono em alguns sítios experimentais no contexto da Amazônia Brasileira.

O *footprint*, que é a representatividade espacial do sensor em campo, estendeu-se por mais de 1 km contra o vento em alguns sítios experimentais. Estas representações espaciais foram sobrepostas aos pixels das imagens Hyperion para verificação da correlação e similaridade estatística.

Em resumo, a originalidade da pesquisa na área das geociências está relacionada à validação das imagens do sensor Hyperion, um sensor orbital, distante cerca de 705 km da

superfície da Terra, com os dados de CO₂ coletados nas torres micrometeorológicas, nas mesmas coordenadas geográficas.

O estudo apresenta uma metodologia baseada na validação do CO₂flux em paisagens naturais (florestas primárias e floresta de transição (floresta úmida e cerrado) e áreas antrópicas (exploração seletiva de madeira e pastagem). Para o resultado, utilizaram-se dados de CO₂ obtidos durante a estação chuvosas e seca, nos anos de 2000 a 2005, nas cinco torres micrometeorológicas, vinculados ao programa LBA, localizadas nos municípios de Manaus (AM), Santarém (PA), Ouro Preto d'Oeste (RO) e Sinop no Mato Grosso.

A manutenção e funcionamento das torres proporcionaram um fator decisivo no estudo. Foi, a partir dos dados de campo aferidos e disponíveis para as coordenadas geográficas na data e hora da passagem do sensor orbital, que foi possível responder aos objetivos do estudo.

Hipótese

As medições indiretas da concentração de CO₂ podem ser monitoradas por meio de sensoriamento remoto hiperespectral e permitem a compreensão de sua dinâmica, baseando-se nas modelagens espectrais de vegetação.

Objetivos

Geral

Analisar a concentração e o fluxo de dióxido de carbono por meio do sensoriamento remoto hiperespectral em determinadas regiões da Amazônia, verificando-se o potencial das imagens do sensor Hyperion para detecção do sequestro florestal de carbono e do conteúdo de CO₂ atmosférico.

Específicos

- Analisar a concentração e o fluxo de dióxido de carbono, a partir das torres de medições de fluxo instaladas na Amazônia Brasileira, correlacionando-as com as análises espectrais da vegetação;
- Validar as modelagens espectrais utilizadas para a verificação de sequestro florestal de carbono, por meio de dados de campo e do processamento digital de imagens hiperespectrais.

Estrutura da Tese

Este estudo compreende cinco partes. A primeira parte é uma introdução dos temas, destacando a Floresta Amazônica e a aplicação dos índices de vegetação para o sequestro do carbono com uso do sensoriamento hiperespectral. Apresenta, ainda, a problematização e a originalidade da pesquisa, bem como a formulação da hipótese de pesquisa e os objetivos alcançados ao longo da tese. A segunda parte trata de uma fundamentação teórica, discorrendo sobre uma vasta e recente discussão sobre a relação do CO₂ e a floresta, índices de vegetação e sensores de alta resolução espectral lançados no espaço para a realização de estudos ambientais. A terceira parte versa sobre as principais características da região amazônica e os sítios experimentais do Programa LBA, onde estão instaladas as torres utilizadas nesse estudo, os procedimentos adotados para análise dos dados, a partir das imagens hiperespectrais, os dados de campo e a análise estatística realizada no estudo. A quarta parte aborda os resultados e a discussão sobre a modelagem do sequestro florestal de carbono com uso de dados hiperespectrais e sua validação a partir dos dados das torres micrometeorológicas. E, finalmente, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. Fundamentação Teórica

Dióxido de Carbono

O carbono (C) é o elemento “mestre” nos ciclos biogeoquímicos do planeta. O seu ciclo é composto de vários ciclos simples, sendo o mais importante o processo de fotossíntese-respiração. Assim, a fonte fundamental de carbono para composição das moléculas orgânicas é o dióxido de carbono (CO_2), uma forma inorgânica oxidada do carbono presente na atmosfera e dissolvida na água (RICKLEFS, 2009).

O CO_2 circula entre quatro principais estoques de carbono, os oceanos, os depósitos de combustíveis fósseis, a biomassa terrestre/solo e a atmosfera. Parte do estoque terrestre do CO_2 é formada por rochas, carbonatos, carvão mineral e petróleo entre outras formas de mineralização e fossilização do carbono ao longo de seu longo ciclo geológico (LEMOS et al., 2010). Além disso, a matéria orgânica morta enterrada nas rochas transforma-se em carvão mineral, petróleo ou gás natural, conhecidos como combustíveis fósseis (BROWN; ALECHANDRE, 2000).

Grandes quantidades de carbono estão imobilizadas nas rochas calcárias na crosta terrestre, mas, a maior parte do carbono da biosfera encontra-se sob a forma de carbonatos dissolvidos nos oceanos (PINTO-COELHO, 2000), que cobrem cerca de 70% da Terra, e o gás carbônico é solúvel em água. A solubilidade do gás carbônico nos oceanos depende de sua concentração na atmosfera, da temperatura dos oceanos e outros fatores. A fixação do CO_2 pelos oceanos se dá por meio da dissolução do gás na água e por fotossíntese. A principal rota de transferência do CO_2 para o fundo dos oceanos é pela sedimentação de carbonato de cálcio insolúvel (CaCO_3), na forma de organismos formadores de exoesqueletos, como conchas e moluscos (TOLENTINO et al., 2004). Deste modo, a decomposição ao longo de milhões de anos leva à formação de depósitos ricos em hidrocarbonetos como petróleo e carvão. Outra parte é redissolvida por processos químicos e biológicos, permanecendo como fração solúvel (MARTINS et al., 2003).

Os fluxos entre os quatro principais estoques de carbono são bidirecionais, o que faz com que as trocas de CO_2 sejam difíceis de estimar (MARTINS et al., 2003). Entretanto, o CO_2 estocado na atmosfera (740 Gt de carbono) é considerado baixo quando comparado aos estoques de carbono terrestres (80 mil Gt de carbono) e oceânicos (42 mil Gt de carbono).

Sendo assim, pequenas variações de fluxo de CO₂ podem gerar grandes variações no estoque atmosférico (LEMOS et al., 2010).

Na atmosfera, o CO₂ é responsável por cerca de 0,033% da composição gasosa total (PINTO-COELHO, 2000). De acordo com Brown e Alechandre (2000), a maior parte da composição da atmosfera é formado pelo nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e argônio (Ar). Sendo estes seguidos dos gases raros (neônio (Ne), criptônio (Kr) e xenônio (Xe)), vapor d'água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ozônio (O₃), hélio (He), metano (CH₄), hidrogênio (H₂) e outros. Além disto, existem partículas de aerossol, produto de processos de combustão incompleta, composta de pó, cinzas vulcânicas, fumaça, matéria orgânica e resíduos industriais em suspensão.

Torres e Machado (2011) sugerem que, nas camadas mais baixas, destacam-se o N₂ e o O₂, embora os demais gases desempenhem importante papel no balanço atmosférico, pois absorvem, refletem e/ou difundem tanto a radiação solar, quanto a reirradiação terrestre. No entanto, a quantidade de moléculas dos gases varia de acordo com altitude, visto que, pela força de gravidade, os elementos mais densos tendem a ficar mais próximos da superfície. Deste modo, a concentração de CO₂ atmosférico gira em torno de 0,03% e cerca de 300 ppm (Tabela II-1).

Tabela II-1. Composição da atmosfera em volume de massa e concentração.

Componentes		% por volume de ar seco	Concentração em ppm de ar
Componentes Fixos	Nitrogênio (N ₂)	78,048	-----
	Oxigênio (O ₂)	20,946	-----
	Argônio (A)	0,934	-----
	Neônio (Ne)	0,00182	18,2
	Hélio (He)	0,000524	5,24
	Metano (CH ₄)	0,00015	1,5
	Criptônio (Kr)	0,00014	1,4
	Hidrogênio (H)	0,00005	0,5
Componentes Variáveis	Vapor d'Água (H ₂ O)	≤ 4	-----
	Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,0325	325
	Monóxido de Carbono (CO)	-----	< 100
	Ozônio (O ₃)	-----	≤ 2
	Dióxido de Enxofre (SO ₂)	-----	≤ 1
	Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	-----	≤ 0,2

Fonte: Torres e Machado (2011).

Esses gases possuem vários efeitos importantes no equilíbrio climático e biogeoquímico do planeta. Além do CO₂, as emissões de metano (CH₄), vapor de água (H₂O), ozônio (O₃), óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonos (CFCs), monóxido de carbono (CO), halocarbonos, óxidos de nitrogênio (NO_x) e gases de origem industrial (hidrofluorcarbono (HFC) e perfluorcarbono (PFC)), também contribuem para o efeito estufa na atmosfera (MENDONÇA; GUTIEREZ, 2000; SAULO et al., 2005; OLIVEIRA, 2008).

O efeito estufa é um fenômeno natural que existe no planeta e funciona como um regulador térmico, aquecendo o planeta, ou seja, absorve o calor irradiado da Terra (BROWN; ALECHANDRE, 2000; MENDONÇA; GUTIEREZ, 2000). Sem esse fenômeno natural, que retém parte do calor do sol, os seres vivos não sobreviveriam, pois a temperatura média do planeta seria de -18°C (PACHEDO; HELENE, 1990; IPAM, 2002; DOW; DOWNING, 2007; D'AMELIO, 2006). Esse fenômeno mantém a temperatura média do planeta, em torno de 16°C (BAPTISTA, 2004). Portanto, esses gases são capazes de absorver a radiação infravermelha (Figura II-1), pois possuem a propriedade de ser opacos aos raios infravermelhos do solo quando dissipados para o espaço e, assim, nem toda essa energia consegue atravessar a camada que envolve o planeta. Por conseguinte, aquecem as baixas camadas da atmosfera (PACHEDO; HELENE, 1990).

Vários autores, Pacheco e Helene (1990), Brown e Alechandre (2000), Mendonça e Gutierrez (2000), Baptista (2004), D'Amelio (2006) e Dow e Downing (2007), Ricklefs (2009), têm estudado o processo do efeito estufa, que pode ser ilustrado na figura II-1: (A) a luz solar de comprimento de onda curto passa através da atmosfera; a luz absorvida aquece a superfície; (B) a superfície aquecida emite radiação infravermelha e (C) a radiação infravermelha é absorvida pela atmosfera e convertida em calor. Assim, cerca de 6% do infravermelho irradiado pela superfície escapa para o espaço, e o restante é absorvido pela atmosfera e irradiado novamente.

Figura II-1. Efeito estufa resultante da absorção de luz infravermelha de comprimento de onda longo pelo CO₂ e outros gases na atmosfera.

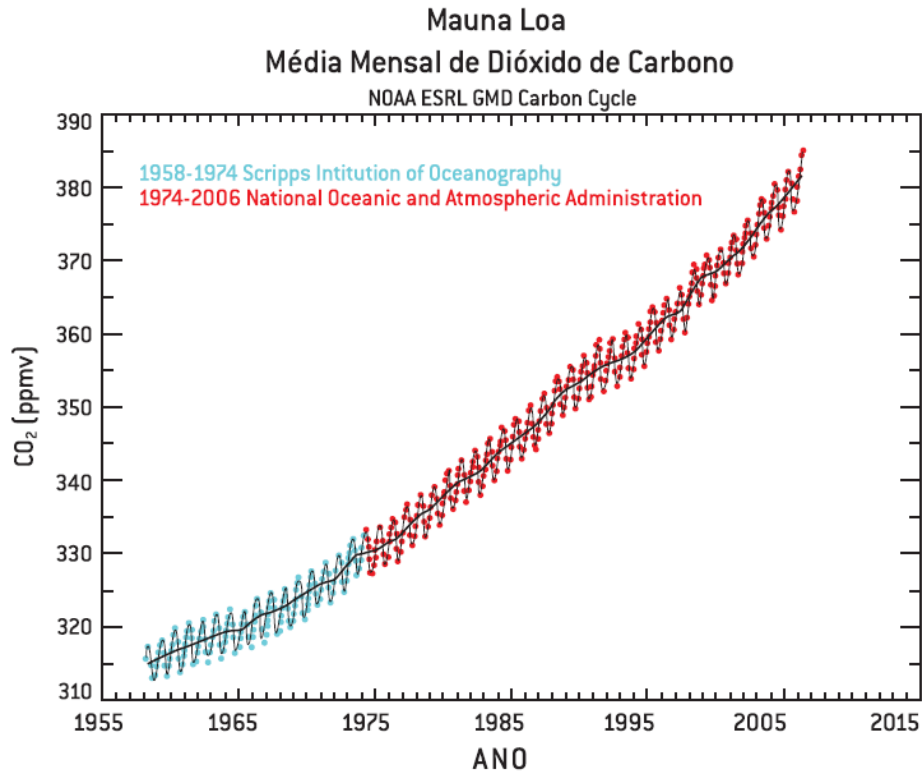


Fonte: Efeito Estufa. Disponível em <http://www.culturamix.com/meio-ambiente/solucoes-efeito-estufa>. Acesso em janeiro de 2014.

O CO₂ é um dos mais importantes gases do efeito estufa. Esse gás é encontrado na atmosfera proveniente do processo de respiração dos seres vivo, emanações vulcânicas, gêiseres e atividades antropogênicas pela conversão de florestas em outros tipos de uso da terra (TORRES; MACHADO, 2011).

A figura II-2 mostra que a concentração de CO₂ ocorre em níveis crescentes, conforme estimativas das últimas três décadas. Pinto-Coelho (2000) estimou que a concentração de CO₂ passou de 320 ppm (partes por milhão) para mais de 350 ppm, em 1987. Em 1995, a concentração de CO₂ atingiu a estimativa de 360 ppm (KEELING et al., 1995). Em 2003, Artaxo e colaboradores estimaram a concentração em torno de 370 ppm. Vale ressaltar que a série dos dados de concentração de CO₂ utilizada pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) se iniciou em San Diego, na Califórnia, no período de 1958 a 1974, em seguida, a série passou a ser obtida na estação Mauna Loa, no Hawaii.

Figura II-2. Concentração de CO₂ em ppm de 1960 a 2010.



Fonte: BAPTISTA, 2009.

Embora a concentração de CO₂ apresente níveis crescentes, a série histórica mostra o efeito da sazonalidade na média mensal de CO₂, com as oscilações de aumento e diminuição ao longo do ano. Como apresentado por Baptista (2009), o grande problema dessa série de dados é agrupar séries históricas de localidades diferentes como se fosse uma só.

É importante ressaltar que a quantidade de carbono no planeta é praticamente inalterada. Spencer (2008) mostrou que a concentração de CO₂, em 2006, equivalia a 380 ppm. Em sua explicação, em cada milhão de molécula de ar, 380 moléculas eram de CO₂, ou seja, em cada 100 mil moléculas de ar, 38 é CO₂. Portanto, as sociedades humanas adicionam apenas uma molécula de CO₂ para cada 100 mil moléculas de ar, a cada cinco anos. Assim, o que existe é uma mudança do local onde CO₂ é encontrado. Quando os hidrocarbonetos são extraídos e utilizados nos processos de combustão, modifica-se a localização do CO₂, ou seja, no primeiro momento, o CO₂ estava depositado abaixo da superfície e, em seguida, transferido para a atmosfera. Esse processo vem ocorrendo desde

a formação do planeta, quando causas naturais elevaram a concentração de CO₂, e esta, por sua vez, elevou a temperatura (TORRES e MACHADO, 2011).

Dióxido de carbono e sua relação com a floresta

A situação é tão favorável para pesquisa que envolve interação dióxido de carbono e floresta que, recentemente, os estudos de SALESKA et al. (2003) desenvolvidos por meio do método de covariância de vórtices turbulentos nas torres de fluxo constataram que a variação sazonal modifica o comportamento do CO₂ na floresta primária.

Von Randow et al. (2004) apresentam resultados feitos em dois diferentes ambientes (floresta primária e pastagem) no sudoeste da Amazônia Brasileira, a partir de medidas comparativas de fluxo de radiação, fluxos de energia e CO₂. Os autores concluíram que, na estação seca, embora a precipitação e a umidade sejam reduzidas, os perfis de armazenamento de umidade do solo indicam que a floresta retira água das camadas mais profundas do solo. Por esta razão, as mudanças sazonais observadas nos fluxos de energia e CO₂ na floresta são baixas, quando comparadas aos processos de evaporação e fotossíntese em ambiente de pastagem, uma vez que o crescimento de gramíneas é constantemente renovado.

Para Vieira et al. (2004), as árvores vivas constituem um dos maiores estoques de carbono em florestas tropicais. Os autores concluíram que o crescimento das árvores é marcado pela sazonalidade, com maior incremento em diâmetro na estação chuvosa e menor na estação seca.

Aguiar et al. (2006) realizaram medidas de fluxo de CO₂, calor sensível e calor latente por meio do método de covariância de vórtices turbulentos. Os autores verificaram como os padrões de variabilidade sazonal e o ciclo diurno dos fluxos de massa e energia interferem na floresta tropical úmida da Amazônia Brasileira.

Araújo et al. (2008) apresentam resultados sobre as medições de fluxos de CO₂ e vapor de água no dossel das florestas tropicais. As medições de CO₂ ao longo de perfis verticais e topossequência indicaram que a concentração máxima de CO₂ se dá pela madrugada, com elevado acúmulo de CO₂ na estação seca. Além disso, os vales acumulam uma quantidade maior de CO₂ do que os planaltos, dependendo da estabilidade atmosférica.

Por fim, Miller et al. (2011), em estudo sobre os impactos gerados nas áreas de manejo florestal, concluíram que o manejo de impacto reduzido causou diminuição na

produção primária bruta de CO₂, proporcionais à perda da copa, processo de respiração e mortalidade de árvores. Assim, o processo de manejo da floresta com impacto reduzido fornece uma estratégia de gestão para minimiza os riscos climáticos, associados às grandes mudanças de uso da terra.

Sensoriamento remoto no estudo da vegetação

O Sensoriamento remoto, segundo os apontamentos de Jensen (2009), foi formalmente definido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) como a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo ou registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo. Alguns autores como Liu (2007) e Novo (2010) definiram o sensoriamento remoto de forma mais geral e simplificada como a “obtenção de informações sobre objetos distantes, sem contato com os mesmos”.

Para Fitz (2008), o sensoriamento remoto é uma técnica que utiliza sensores para captação e registro a distância, sem o contato direto, da energia refletida ou absorvida pela superfície terrestre.

Entretanto, para uma definição científica com base nos princípios do sensoriamento remoto e sua interação com a radiação eletromagnética (REM), a definição mais completa sugerida por Meneses (2011 p.3) é:

“... uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres”.

De acordo com Novo (2008), o sensoriamento remoto é uma integração conjunta, que se utiliza de modernos sensores, equipamentos para processamentos de dados, equipamentos de transmissão de dados com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações eletromagnéticas e as substâncias componentes encontrados na Terra.

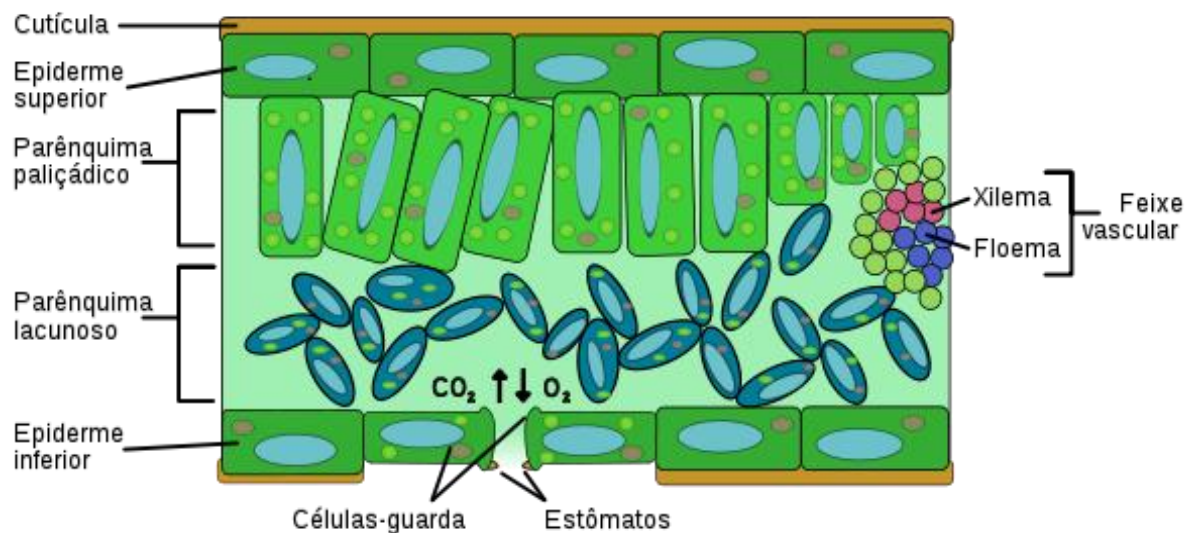
Os dados de sensoriamento remoto disponíveis não se limitam somente à observação da terra, mas referem-se aos estudos dos oceanos, do magnetismo terrestre e da atmosfera (EHLERS, 2007).

Essa tecnologia teve um extraordinário avanço nos últimos anos. Em particular, a partir do advento dos sensores orbitais de alta resolução espacial e espectrais, acrescentando de forma substancial o volume de dados sobre a Terra (FEITOSA et al., 2007).

A interação da radiação eletromagnética com a vegetação está intimamente ligada aos processos fundamentados na absorção da radiação eletromagnética por partes dos pigmentos fotossintetizantes das plantas, especificamente na região do visível (0,40 a 0,72 μm) e que exige um nível de conhecimento para cada escala de trabalho, seja em uma folha, em uma planta, seja em um conjunto de plantas (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2010), as folhas são constituídas por diferentes tecidos em que a face ventral é aquela que está voltada para cima e que recebe maior quantidade de radiação eletromagnética. Nessa face, são encontrados diferentes tipos de estruturas de proteção. Abaixo se encontra a epiderme, composta por células alongadas e diferenciadas, nestas estruturas, são formados os estômatos. Abaixo da epiderme, verificamos o mesófilo paliçádico, compostos de cloroplastos, onde se localizam os pigmentos fotossintetizantes. Na face dorsal da folha, podemos verificar o mesófilo esponjoso, onde são encontradas maiores quantidade de lacunas entre as células preenchidas com gases resultantes dos processos de respiração e transpiração. Segue-se novamente a epiderme, com número frequentemente maior de estômatos em relação à face ventral e finalmente uma camada de cera ou cutícula (Figura II-3).

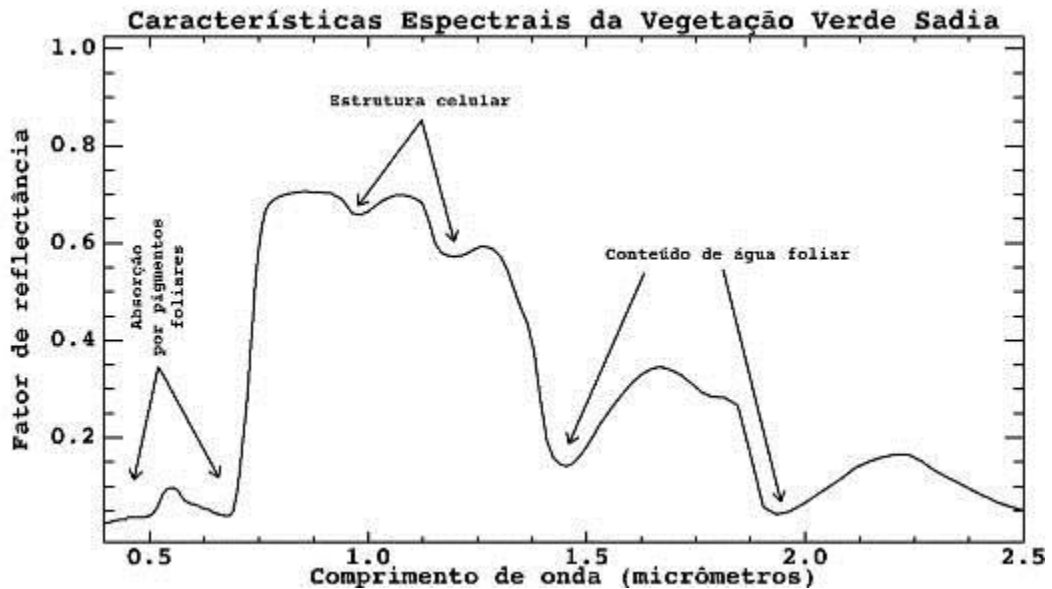
Figura II-3. Anatomia de corte transversal de uma folha.



Fonte: Estrutura da Folha. Disponível em <http://numberpi.blogspot.com.br/2011/07/estrutura-da-folha-e-dos-cloroplastos.html>. Acesso em 28/09/2012.

O processo de interação por meio dos fenômenos de absorção, transmissão e reflexão entre a radiação eletromagnética referente ao espectro óptico e uma folha é dependente dos fatores químicos (pigmentos fotossintetizantes e água) e estruturais (organização dos tecidos da folha). Esses três fenômenos proporcionam o comportamento espectral da vegetação (Figura II-3).

Figura II-4. Curva espectral de uma folha verde.



Fonte: Adaptada de Araújo (1999).

Na vegetação, o comportamento espectral é medido em três regiões do espectro eletromagnético. Conforme Assunção e Formaggio (1989); Ponzoni e Shimabukuro (2010), as três regiões do espectro que interagem com a vegetação são: o visível (0,4 μm – 0,72 μm), o infravermelho próximo (0,72 μm – 1,1 μm) e o infravermelho médio (1,1 μm – 2,5 μm).

- Na região do visível (0,4 μm – 0,72 μm), os pigmentos das folhas geralmente encontrados nos cloroplastos, são clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%). Nessa faixa do espectro, a energia eletromagnética interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é transmitida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia armazenada na forma de componentes orgânicos por meio da fotossíntese. Os pigmentos predominantes absorvem radiação na região do azul (0,445 μm), mas somente a clorofila

absorve na região do vermelho (0,645 μm). As maiorias das plantas são moderadamente transparentes na região do verde (0,540 μm).

- Na região do infravermelho próximo (0,72 μm – 1,1 μm), ocorre uma pequena absorção da radiação e considerável espalhamento interno da radiação na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região, enquanto que a reflectância é quase constante, isto se deve ao resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água, podem causar alterações na relação (água e ar) no mesófilo, podendo alterar quantitativamente a reflectância de uma folha nessa região. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente e, conseqüentemente, maiores, serão também os valores de reflectância.
- Na região do infravermelho médio (1,1 μm – 2,5 μm), a absorção devida à água líquida afeta a reflectância das folhas. A água absorve consideravelmente a radiação incidente na região espectral compreendida entre 1,3 μm a 2,0 μm . A absorção da água se dá pontualmente em 1,1 μm , 1,45 μm , 1,95 μm , 2,7 μm .

Essas três regiões (visível, infravermelho próximo e infravermelho médio), que compõem o espectro de resposta da vegetação e também o restante das regiões do espectro eletromagnético, podem ser detectadas e registradas por sensores multiespectrais e hiperespectrais.

Conforme destaca Novo (2010), o comportamento espectral da vegetação se modifica ao longo do seu ciclo vegetativo, devido ao tipo de cultura, o ângulo de visada, a arquitetura do dossel e o tipo de substrato.

A arquitetura do dossel é muito importante quando se considera a produção agrícola e os ecossistemas naturais, pois determina como a luz será eficientemente absorvida. Altas produtividades dependem em parte da extensão de área de solo que é coberta com superfície fotossintetizante (VIEIRA et al., 2010).

De acordo com Liu (2007), o comportamento da radiação eletromagnética nos dosséis passa por várias camadas nas folhas de vegetação em campo. A radiação é refletida uniformemente em todas as direções. A sua intensidade diminui exponencialmente na sua

passagem atravessando várias camadas de folhas que absorveram a radiação subsequentemente. Essa é refletida e espalhada várias vezes até chegar à superfície do solo. As florestas, pastagens e culturas em campo, geralmente, produzem bastante folhas cobrindo o solo. Assim, a intensidade final da radiação é muito baixa quando chega a sua superfície. Mas, para vegetações esparsas, a reflectância do solo contribui com uma porção apreciável da reflectância. Em suma, as reflectâncias com um alvo como a vegetação são um conjunto resultante da reflectância bidirecional da copa da vegetação que é uma mistura dos diferentes componentes:

- Transmitância de folha;
- Quantidade e orientação das folhas;
- Características das plantas (caules, troncos, galhos e sua arquitetura);
- Características de fundo (reflectância do solo, folhas caídas e sombras);
- Ângulo zenital do sol;
- Ângulo de elevação do sol;
- Ângulo de visada dos sensores de satélite.

Na estrutura da vegetação, o dossel é o estrado superior da formação vegetal. É a camada contínua de uma floresta, arvoredo ou cerradão, composta pelo conjunto de copas das plantas lenhosas mais altas. E, de acordo com a porcentagem de cobertura do solo pelas plantas, o dossel pode ser classificado em duas categorias: incompleto e completo (MOREIRA, 2011):

- O dossel é considerado incompleto quando apresenta baixa porcentagem de cobertura do solo, como por exemplo, uma cultura agrícola no início do desenvolvimento vegetativo. Nessa fase de crescimento da cultura, a energia refletida da área é composta de uma parte proveniente das plantas e outra do solo onde foi implantada.
- À medida que a vegetação ou cultura atingem seu limite máximo, o dossel é considerado completo, correspondendo a uma cobertura vegetal próximo a 100%.

A densidade da vegetação e sua orientação espacial exercem influência fundamental na dinâmica da reflectância de um dossel em função da variação nas geometrias de iluminação e de visada. Nesse processo, as propriedades espectrais dos solos tornam-se fortemente influentes na reflectância de um dossel, se o mesmo for pouco denso ou aberto (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Para Moreira (2011), além dos fatores discutidos anteriormente, existem outros que devem ser levados em consideração, quando se estudam os dosséis e sua interação com a energia eletromagnética. Esses fatores estão relacionados ao déficit de água no solo; morfologia das folhas; toxicidade de macro e micronutrientes presentes no solo; tipo de relevo e fatores climáticos, como altas temperaturas, geadas e granizos.

O processo de fotossíntese é somente atribuído aos seres autótrofos, capazes de capturar, transformar e armazenar a energia radiante eletromagnética gerada pelo sol, em compostos orgânicos com ligações químicas ricas em energia. Esses compostos orgânicos são sintetizados a partir da matéria-prima inorgânica na presença da luz e clorofila, em compostos orgânicos e oxigênio (VIEIRA et al., 2010).

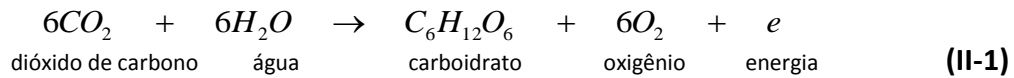
As plantas clorofiladas e bactérias quimiossintetizantes utilizam CO_2 para realização do processo de fotossíntese na formação de compostos orgânicos carbonatos (amido e celulose) caracterizando uma absorção (SILVA JÚNIOR, 2003).

Do total da energia solar incidente na superfície das folhas somente 5% são convertidas em carboidratos. Cerca de 95% da energia que atingem as folhas, 60% constituem as radiações não absorvidas, 8% são perdidas na forma de calor e 19% usados no metabolismo (VIEIRA et al., 2010).

A fixação de CO_2 por fotossíntese pelas plantas converte a energia solar (Radiação Fotossinteticamente Ativa – RFA) em energia química que é utilizada para a manutenção e crescimento da vegetação terrestre e aquática, sustentando a cadeia trófica (VIEIRA et al., 2010).

De acordo com Moreira (2011), a fotossíntese é o processo pelo qual as plantas verdes produzem carboidratos a partir da água (absorvido pelo sistema radicular) e do CO_2 absorvido pela atmosfera, medido pela radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAAb) ou radiação solar de comprimento de onda entre 0,4e 0,7 μm (luz visível).

A fotossíntese é expressa pela seguinte equação que indica que seis moléculas de CO_2 e seis moléculas de água (H_2O) produzem uma molécula de glicose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) e seis moléculas de oxigênio (O_2).



De acordo com Moreira (2011), a fotossíntese é o único processo na folha, que está diretamente envolvido na radiação solar. A energia utilizada pelas plantas corresponde à luz azul (0,4- 0,53 μm) e a vermelha (0,6-0,73 μm), que são captados pelos cloroplastos.

A fotossíntese é dividida em duas etapas: reações fotoquímicas e bioquímicas. As fotoquímicas envolvem a captura de energia solar pelos cloroplastos e as reações bioquímicas consistem na redução do gás carbônico (CO_2) e produção de açúcares.

Para Vieira et al. (2010), entre os componentes específicos dos cloroplastos, os mais importantes são os pigmentos. Os pigmentos são compostos orgânicos capazes de absorver a radiação solar visível ou radiação fotossinteticamente ativa – RFA (0,4 a 0,7 μm). Do total de energia que chega até as plantas, 50% consistem de RFA. Os pigmentos estão localizados no interior dos cloroplastos, especificamente, nos tilacoides e lamelas. As principais classes são as clorofilas e os carotenoides (Tabela II-2).

Na presença de quantidade adequada de luz, altas concentrações de CO_2 atmosférico favorecem elevadas taxas fotossintéticas (VIEIRA et al., 2010).

Tabela II-2. Principais pigmentos encontrados nas folhas.

Pigmentos		Máxima absorção da luz (μm)	Ocorrência
Clorofila "a"		0,430 a 0,660	Todas as plantas superiores
Clorofila "b"		0,453 a 0,643	Plantas superiores e algas verdes
α - Caroteno		0,420, 0,440 e 0,470	Plantas superiores e algumas algas
β - Caroteno		0,425, 0,450 e 0,480	Todas as plantas superiores
Xantofila	Lutol	0,425, 0,445 e 0,475	Todas as plantas superiores e algumas algas
	Violoxanto	0,425, 0,450 e 0,475	Plantas superiores

Fonte: Moreira (2011).

É importante destacar ainda que, quando analisamos os fatores que interferem na reflectância de folhas e dosséis, deve-se mencionar a respeito dos equipamentos que são utilizados nessas medições, que podem gerar ruídos nas imagens de satélite e também da interferência atmosférica sobre os resultados dessas medições (PONZONI et al., 2012).

De acordo com Meneses e Almeida (2011), as imagens podem conter erros aleatórios de pixels ou erros coerentes de linhas de pixels que, normalmente, se mostram como pixels ou linhas com valores saturados (claros), ou sem sinal (escuras). É reconhecido como um erro do valor digital do pixel. São denominados de ruídos, e, tipicamente, esses ruídos espúrios e imprevisíveis são decorrentes de erros instrumentais.

Larguras de bandas muito estreitas diminuem a quantidade de energia radiante do pixel, o que ocasiona baixa razão sinal/ruído e, também, a interferência da atmosfera pode tornar-se mais intensa. O ruído é também um sinal, mas gerado pelo próprio sensor em virtude do funcionamento elétrico de seus componentes (MENESES, 2011, p.29).

Mesmo com a riqueza de informações dos dados provenientes de sensores hiperespectrais, deve-se considerar que, para obter informações precisas, tanto na identificação, quanto na quantificação mineral, é fundamental eliminar ou minimizar a interferência de ruídos (CARVALHO-JÚNIOR et al., 2002).

Embora o desempenho do sinal-ruído e estabilidade do Hyperion seja muito mais baixo do que o do sistemas do AVIRIS (*Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer*), as imagens Hyperion possibilitam calcular um conjunto de índices que, além do tradicional, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), podem indicar diferenças na estrutura do dossel, na bioquímica e fisiologia de povoamentos florestais tropicais e outros tipos de vegetação (ASNER et al., 2004).

Portanto, a análise do ruído é fundamental para a aquisição de bons dados, pois a capacidade de detecção de alvos está intimamente relacionada à relação sinal/ruído (CARVALHO-JÚNIOR et al., 2002).

A atmosfera do planeta Terra não é totalmente transparente à radiação solar porque os gases e aerossóis formam barreiras que impedem que essa radiação chegue à superfície terrestre. Mas a atmosfera, seletivamente, transmite quase totalmente a radiação em determinadas faixas de comprimento da onda eletromagnética, que são conhecidas como janelas atmosféricas. Fora dessas bandas, a energia da radiação eletromagnética é atenuada. Assim, a maioria dos sensores de satélites são desenhados para adquirir dados

nas faixas de janelas atmosféricas (LIU, 2007), o que não acontece com os sensores hiperespectrais.

Por causa das presenças de vapor da água, nuvens e outros constituintes atmosféricos, os valores de reflectância recebidos pelos sensores acima de 700 km são sujeitos às interferências atmosféricas, como absorção, espalhamento, emissão e reflexão em processos múltiplos. Para obter boas correções atmosféricas, são exigidos os dados meteorológicos locais, tais como perfis de concentração de vapor de água, CO₂, aerossóis, O₃ e temperatura (LIU, 2007).

O espalhamento, por exemplo, é um processo físico que resulta da obstrução das ondas eletromagnéticas, por partículas existentes nas suas trajetórias, ao penetrarem na atmosfera terrestre. Essa obstrução pode ser tanto da energia incidente, quanto da reirradiada (refletida). A intensidade e a direção do espalhamento dependem da razão entre os diâmetros das partículas presentes na atmosfera e o comprimento de onda da energia eletromagnética incidente e/ ou refletida. Assim, as moléculas de gases, denominadas espalhamento molecular, presentes na atmosfera terrestre, espalham mais eficientemente a energia eletromagnética de menores comprimentos de onda (MOREIRA, 2011).

O espalhamento é uma consideração muito importante em pesquisas de sensoriamento remoto, podendo reduzir severamente o conteúdo de informação dos dados até o ponto que a imagem perde contraste e torna-se difícil diferenciar um objeto de outro (JENSEN, 2009).

Alguns fótons são absorvidos por aerossóis ou gases atmosféricos. Geralmente, a absorção por aerossóis é pequena, e os canais dos sensores multiespectrais evitam as faixas de absorção molecular. Entretanto, isso não ocorre nos sensores hiperespectrais que possuem canais contíguos recobrimo toda uma faixa do espectro. O espalhamento molecular por aerossóis é o efeito atmosférico mais importante na faixa do visível, enquanto que a absorção por gases da atmosfera é o efeito mais importante na faixa de 1,0 a 2,5 μm (BAPTISTA, 2006).

A correção atmosférica é feita com a intenção de minimizar os efeitos atmosféricos na radiância de uma cena, visto que a atmosfera afeta a radiância refletida pela superfície (SANCHES, 2004). Os métodos de correções atmosféricas são aplicados para corrigir os efeitos atmosféricos nas bandas, a partir de dados meteorológicos de cada local.

Sensoriamento Remoto Hiperespectral

Os dados hiperespectrais ou espectroscopia de imageamento representaram, no final do século XX, uma das rupturas paradigmáticas mais impactantes no sensoriamento remoto, pois as imagens saltaram da dimensão de algumas poucas bandas para a dimensão de centenas de bandas contínuas no espectro da reflectância, identificando a composição e os conteúdos dos materiais, assim como se faz da análise dos espectros de reflectância obtidos com os espectrorradiômetros (BAPTISTA, 2011).

Os sistemas sensores hiperespectrais apresentam alta resolução espectral com bandas estreitas e imageiam o mesmo intervalo do espectro refletido com mais de 100 bandas. Permitem investigar a saúde e o vigor da vegetação, composição mineralógica do solo exposto e dos afloramentos de rochas, entre outras, devido à interação da radiação eletromagnética com as partículas, átomos e moléculas em determinado comprimento de onda (BAPTISTA, 2006).

De acordo com Green et al. (1998), um sensor hiperespectral permite a aquisição de imagens em mais de 50 bandas espectrais contíguas. A contiguidade, o número de bandas e a largura nominal de cada banda são fundamentais para ao conceito de sensoriamento hiperespectral, pois a análise dos dados derivados desses sensores se baseia na identificação de feições de absorção presentes no espectro, para se determinar tipo de material presente, sua abundância e distribuição espacial.

O conceito de espectroscopia apareceu na década de 1980, quando Alexander Goetz e seus colegas do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL/NASA) iniciaram uma revolução no sensoriamento remoto por meio do desenvolvimento de novos instrumentos como o *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS), conhecido hoje como AVIRIS (GREEN, 1998).

O AVIRIS foi o primeiro sistema aerotransportado de imageamento para aquisição de bandas espectrais contíguas e estreitas ao longo da porção refletida do espectro solar de 0,4 a 2,5 μm (BAPTISTA, 2006).

A introdução do conceito de imageamento por espectroscopia estabeleceu os fundamentos para o campo conhecido hoje como sensoriamento remoto hiperespectral, e influenciou significativamente a evolução das técnicas de processamento para dados de sensoriamento remoto. Com centenas de canais espectrais disponíveis nesse momento, os espectros contêm detalhes suficientes para compreender os princípios da espectroscopia por meio da análise do pixel. As técnicas utilizadas regularmente em processamento de

imagens hiperespectrais exigem uma complexidade em termos de formalismos matemáticos, mas alguns algoritmos baseiam-se nos utilizados nas imagens multiespectrais (PLAZA et al., 2009).

As imagens hiperespectrais representam, atualmente, uma nova abordagem com relação às técnicas de sensoriamento remoto para diversos usos, distinguindo-se, em certos aspectos, das utilizadas em imagens orbitais multiespectrais. O advento dos sensores hiperespectrais estabeleceu uma mudança epistemológica no processamento digital de imagens ópticas (CARVALHO JÚNIOR et al., 2002).

A imagem hiperespectral é uma forma diferente de se pensar com relação aos dados de sensoriamento remoto, pois integra imagens convencionais e espectroscopia para obter informação espacial e espectral de um determinado material ou alvo (GOWEN et al., 2007).

Cada pixel da cena permite a aquisição de um espectro de forma praticamente contínua, produzindo dados com resolução espectral suficiente para identificar materiais por meio de suas feições de absorção (SHIPPERT, 2004).

As imagens hiperespectrais fornecem uma diversidade de informações sobre a estrutura e propriedades bioquímicas e fisiológicas, incluindo cobertura de material fracionário, concentrações de nutrientes, pigmento, FPAR e utilização da eficiência da luz (ASNER et al., 2005a).

O componente fundamental de um sistema hiperespectral é o sistema de dispersão da radiação eletromagnética que permite decompô-la em pequenos intervalos de comprimentos de onda, para que cada intervalo possa incidir sobre uma matriz de detectores. Assim, nesses sensores, são utilizadas grades de difração que dispersam a luz de acordo com diferentes mecanismos, utilizando espectrômetros imageadores a bordo de plataformas aéreas e/ou orbitais (NOVO, 2008; SOUZA, 2009).

A aquisição de dados hiperespectrais pode ser verificada a partir de suas abordagens práticas para a espectrometria de imageamento. A abordagem “*whiskbroom*”, no qual o fluxo radiante proveniente de um IFOV (*Instantaneous Field of View*) ou campo de visada instantâneo é transmitido para um espectrômetro, onde sofre dispersão e é focalizado sobre um arranjo linear de detectores, assim, cada pixel é, simultaneamente, medido em tantas bandas espectrais quantos forem os elementos detectores no arranjo linear.

Esta abordagem é mais adequada aos sensores aerotransportados, que voam lentamente e quando o tempo de leitura do arranjo de detectores for uma pequena fração do tempo de integração. Para a espectrometria de imageamento orbital, são utilizados os arranjos bidimensionais de área, assim, existe uma coluna de elementos detectores espectrais para cada pixel no sentido transversal da cena (JENSEN, 2009).

Em contraste com os sensores multiespectrais, a quantidade de informação registrada pelos espectrômetros hiperespectrais excede o requerido para diagnosticar muitas feições, resultando em uma imagem de alta resolução espectral e ampla faixa do espectro, o que permite identificar diferenças sutis entre as respostas espectrais dos alvos (SOUZA, 2009) decorrente da discriminação das propriedades físico-químicas, resultante da interação eletromagnética dos alvos com o sensor (SOUZA et al., 2011).

Tem como vantagem a capacidade de compor uma imagem adquirindo instantaneamente milhares de espectros, com um nível de resolução espectral mais próximo daquele verificado em espectrorradiômetros de campo ou de laboratório (RUDORFF et al., 2007). Essas assinaturas espectrais, nesse nível de detalhe, outrora, eram obtidas somente em laboratório (SILVA, 2006). Assim, quanto maior o número de bandas, melhor é a reconstituição de feições de absorção espectral que podem ser usadas para identificação de alguns materiais na cena, incluindo a indicação na imagem, da presença de minerais espectralmente dominantes nos espectros de solos (PIZARRO et al., 2001).

Atualmente, estão em operação algumas unidades de espectrômetros, orbitais e aerotransportados. Os sensores aerotransportados estão entre a maior parte dos sensores hiperespectrais. Destacam-se como, sensores hiperespectrais, alguns sistemas como AVIRIS, o CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager* – Imageador Espectrográfico Compacto Aerotransportado), o Hymap (*Hymap Airborne Hyperspectral Scanner* – Varredor Hiperespectral Aerotransportado), o PHI (*Pushbroom Hyperspectral Imager* – Imageador Hiperespectral de Varredura Eletrônica), o Hyperion, o CHRIS, entre outros sensores orbitais (Anexo B).

Embora as imagens hiperespectrais apresentem grandes vantagens na extração de informações, pois têm a capacidade de compor uma imagem adquirindo instantaneamente milhares de espectros, com um nível de resolução espectral mais próximo daquele verificado em espectrorradiômetros de campo ou de laboratório (RUDORFF et al., 2007), as

características especiais de imagens hiperespectrais apresentam também problemas de processamento.

A natureza de alta-dimensionalidade de dados hiperespectrais introduz limitações importantes em classificadores supervisionados, tais como, a disponibilidade limitada de amostras de treinamento ou inerentemente à estrutura complexa dos dados (LEMOS, 2003, LICZBINSKI, 2007; PLAZA et al., 2009).

Para Plaza et al. (2009), existe, ainda uma necessidade de desenvolver e implementar algoritmos capazes de acelerar o desempenho dos processamentos e satisfazer o elevado custo computacional requerido no tempo-crítico das aplicações do sensoriamento remoto. Entretanto, com a difusão dos dados dos sensores hiperespectrais, as análises sobre o comportamento e a fisiologia da vegetação tornam-se cada vez mais acuradas, principalmente com introdução de novas abordagens a partir dos índices de vegetação.

Com o surgimento dos sensores hiperespectrais, pode-se obter índices de vegetação que permitem detectar propriedades específicas da vegetação. Para Dalponte et al. (2009) os sensores hiperespectrais são instrumentos importantes e poderosos no estudo da vegetação, em um estudo realizado para enfrentar os problemas de classificação em complexas áreas de florestas, os autores encontraram resultados satisfatórios para detalhar o comportamento espectral das classes de informações.

Realizar estudo sobre o funcionamento de ecossistemas em florestas tropicais é muitas vezes difícil de medir, devido à inacessibilidade de área, tanto com relação ao relevo, muitas vezes acidentado, quanto com relação ao emaranhado das florestas e das copas das árvores, muitas vezes com mais de 50 metros de altura. Mas, dados de sensoriamento remoto e o avanço das imagens hiperespectrais podem permitir esses tipos de análise.

O sensoriamento hiperespectral pode indicar resultados satisfatórios com exatidão, precisão e aplicabilidade em pesquisas ecológicas. ASNER et al. (2005b), utilizando imagens hiperespectrais, possibilitaram por meio de algoritmos de análise de fração de cobertura, destacar diferenças estruturais básicas em áreas de grande variabilidade de zonas ambientais, diferenciando áreas de florestas úmidas, montana, submontana, alpinos, áreas de florestas mais secas e solo exposto. Além disso, possui um grande potencial e rapidez na geração de informações, dando uma visão geral para analisar carências nutricionais em ambientes específicos, como as savanas (KNOX et al., 2011).

Sensor Hyperion e Aplicações com Índices de Vegetação

O sensor Hyperion integra parte do programa de tecnologias revolucionárias da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), que constitui uma nova etapa de aquisição de dados dentro do âmbito dos sistemas sensores hiperespectrais (PIZARRO et al., 2001). O sensor Hyperion vem operando a bordo da plataforma experimental da NASA “*Earth Observing-1*” (EO-1), e que foram lançados em 21 de novembro de 2000 (Figura II-5).

Figura II-5. Satélite EO-1 em órbita.



Fonte: https://directory.eoportal.org/documents/163813/412271/EO1_Auto35. Acesso em 11/09/2014.

O sensor Hyperion fornece uma nova classe de dados de observação para uma melhor caracterização da superfície terrestre, baseada na qualidade calibração herdada do sensor hiperespectral - LEWIS HSI, primeiro sensor a orbitar a Terra, lançado em 23 de agosto de 1997, com o objetivo de demonstrar o avanço de tecnologia em naves espaciais para medir mudanças na superfície terrestre. A missão falhou devido à perda de energia solar na espaçonave. O contato com a nave foi perdido em 26 de agosto, e, em seguida, entrou na atmosfera e foi destruída em 28 de setembro (NASA, 2014).

O satélite EO-1 foi colocado em órbita como parte de uma missão com duração inicial prevista para um ano, com o objetivo de validar e demonstrar novas tecnologias de sensoriamento remoto hiperespectral.

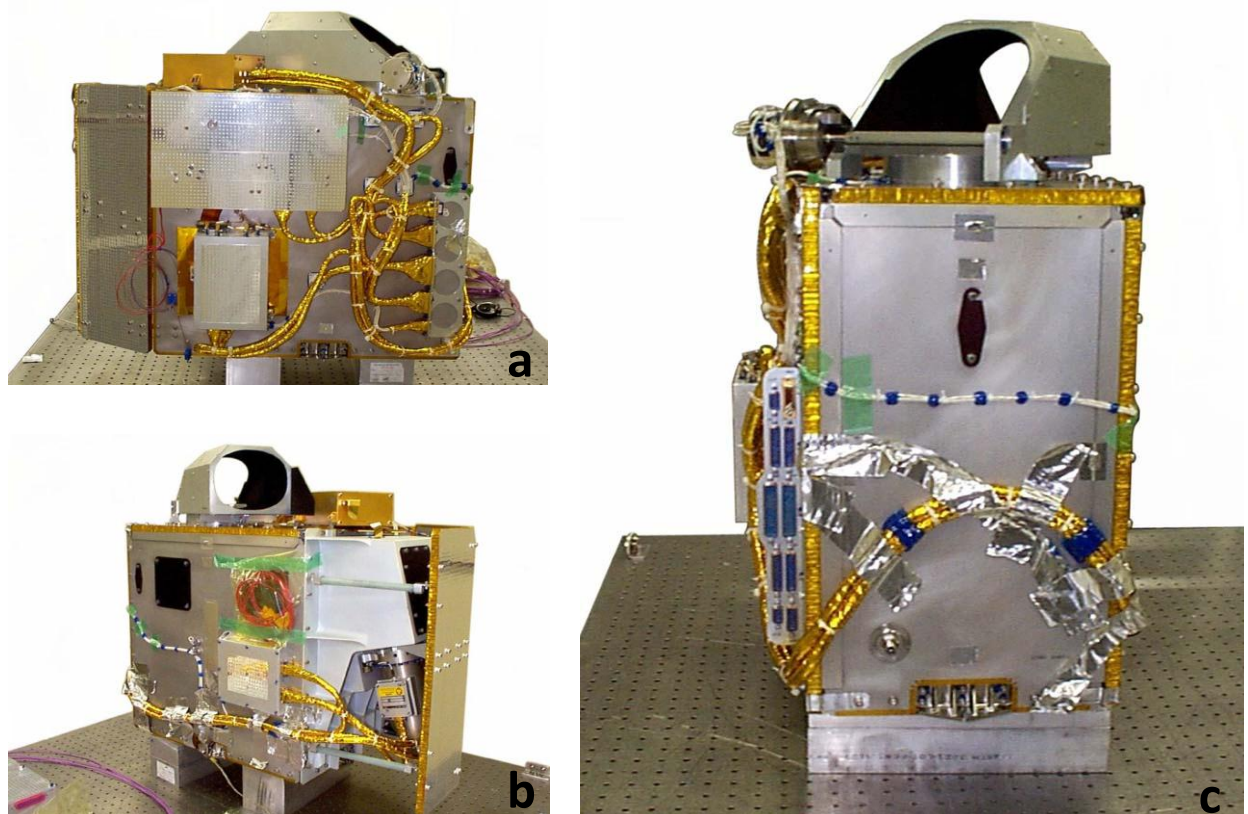
Devido ao grande interesse da comunidade científica, foi firmado um acordo entre a NASA e o USGS (*United States Geological Survey*) para a continuidade da missão (DUCART et al., 2007).

O satélite EO-1 segue uma órbita circular Sol-síncrono a uma altura nominal de 705 km do Equador, viajando no sentido norte-sul (descendente na face imageada) com passagem equatorial média entre 10:00 e 10:15 da manhã. O EO-1 perfaz 14 órbitas por dia, com um ciclo de repetição de 16 dias (LINN, 2008).

O sensor Hyperion (Figura II-6) fornece dados calibrados de alta qualidade que podem apoiar a avaliação da tecnologia hiperespectral para missões de observação da Terra. Cobre o intervalo espectral entre 0,4 a 2,4 μm , com resolução espacial de 30 m e largura da imagem de 7,5 km por 100 km área de terra por imagem (PEARLMAN et al., 2001).

Cada cena possui 242 bandas, das quais, 196 são radiometricamente calibradas, e os dados são quantificados em 12 bits (UNGAR et al., 2003; BAPTISTA, 2006).

Figura II-6. Sensor Hyperion Imaging Spectrometer - a) vista lateral esquerda, b) vista lateral direita e c) vista posterior.



Fonte: <http://eo1.gsfc.nasa.gov/new/Technology/HypGallery.html>. Acesso em 14/01/2014).

De acordo com Accioly et al. (2005), o detalhamento das curvas espectrais do sensor Hyperion permite uma melhor distinção entre alvos, possibilitando ainda melhorar as técnicas de realce. A alta resolução espectral das imagens Hyperion implica um grande potencial para a identificação de diferentes tipos de superfícies, baseado nas características de suas respostas espectrais específicas (SCHRAMM; VIBRANS, 2007).

O sistema opera por varredura eletrônica do tipo *pushbroom* e contém um único telescópio e dois espectrorradiômetros imageadores: um operando no visível e infravermelho próximo (VNIR) e o outro no infravermelho de ondas curtas (SWIR). Um filtro dicróico direciona as bandas de 0,4 a 1,0 μm para um espectrorradiômetro e as bandas de 0,9 a 2,5 μm , para o outro. Os espectrorradiômetros se sobrepõem de 0,9 a 1,0 μm (UNGAR et al., 2003). As principais características do desempenho instrumento são apresentadas na tabela II-3.

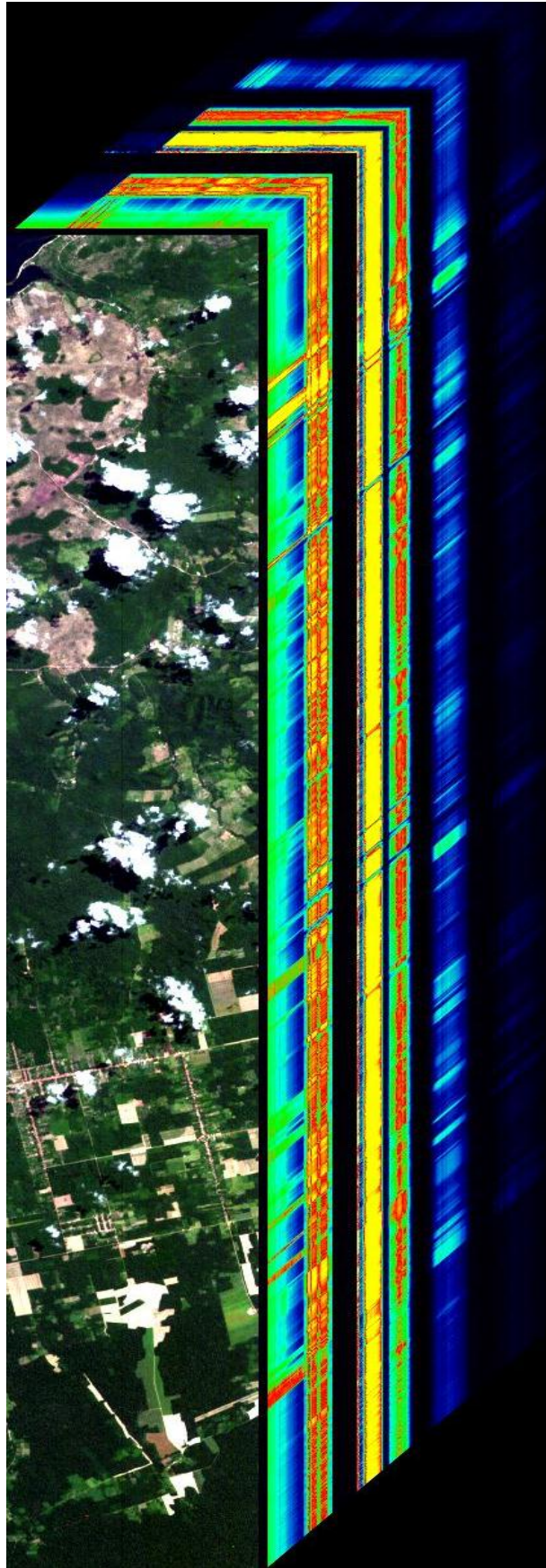
Tabela II-3. Características do sensor Hyperion.

Parâmetros	Sensor Hyperion
Resolução Espacial	30 m
Resolução Espectral	0,4 - 2,5 μm
Resolução Temporal	16 dias
Resolução Radiométrica	12 bits
Número de Bandas	242
Bandas no visível	35
Bandas no Infravermelho Próximo	35
Bandas no Infravermelho de Ondas Curtas	172
Bandas no Infravermelho Termal	0
Bandas Pancromáticas	0
Largura da Banda	0,01 μm
Largura da Imagem	7,5 km por 100 km
Cobertura Espectral	Contínua
Tamanho Aproximado dos Arquivos	~200 Mb

Fonte: <http://eo1.usgs.gov/sensors/hyperion>. Acesso em 21 mar 2013.

Uma forma interessante de visualizar as informações espectrais das cenas é a chamada imagem cubo ou cubo hiperespectral, que ilustra a quantidade de informações (volume de dados) que retorna do instrumento. Na figura II-7, apresenta-se o conceito de uma imagem espectral "cubo." Duas dimensões espaciais mostram o conteúdo espacial habitual na cena, enquanto a terceira "profundidade", dimensão do cubo, mostra o espectral em cada pixel.

Figura II-7. Cubo espectral de uma imagem do sensor Hyperion correspondente à imagem da torre K67 (2003 233) de 21 de agosto de 2003.



Índices de Vegetação e Aplicações com Dados Hyperion

Os índices de vegetação em sensoriamento remoto são um dos dados mais utilizados para o monitoramento de diferentes ambientes, seja para solos, água e vegetação.

São utilizados para monitorar e quantificar as condições de distribuições espaciais da vegetação e são obtidos por várias combinações matemáticas das reflectâncias em várias faixas espectrais.

Diversos índices têm sido propostos com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do visível e infravermelho próximo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Tais índices baseiam-se no fato de que a energia refletida no vermelho e infravermelho próximo é diretamente relacionada à atividade fotossintética da vegetação, bem como na suposição de que a utilização de duas ou mais bandas espectrais podem, substancialmente, minimizar as principais fontes de ruídos que afetam a resposta da vegetação em relação às variações na irradiância solar; efeitos atmosféricos; contribuições da vegetação não fotossinteticamente ativa; contribuições do substrato e efeitos da composição e estrutura do dossel (FERREIRA et al., 2008).

Dentre os índices, destacam-se o PVI (*Perpendicular Vegetation Index* - Índice Perpendicular Vegetação), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo), WDVI (*Weighted Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação por Diferença Ponderada), SBI (*Soil Brightness Index* - Índice Brilho do Solo), GVI (*Green Vegetation Index* - Índice de Vegetação Verde), SR (*Simple Ratio* - Índice de Vegetação da Razão Simples), RVI (*Ration Vegetation Index* - Índice de Vegetação pela Razão).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) proposto por Rouse et al. (1973) é um dos índices mais difundidos para análise de vegetação, que provém da equação composta pelas respostas das bandas espectrais do vermelho e infravermelho.

O NDVI, apesar de continuar sendo um dos índices mais utilizados em pesquisas na área de vegetação em sensoriamento remoto, por sua facilidade e simplicidade de aplicação. Porém tem sua eficiência diminuída quando o alvo possui elevada biomassa devido ao fenômeno de saturação, como ocorre na Floresta Amazônica. O NDVI é não linear e satura

em áreas com alta biomassa de vegetação (CARLSON; RIPLEY (1997); HUETE, 1988; HUETE et al., 2002).

O índice de vegetação melhorado ou realçado EVI emprega as bandas espectrais do infravermelho próximo, região do vermelho, e a reflectância na faixa do azul é utilizada para indicar o vigor vegetativo (HUETE et al., 1997). Entretanto, a banda do azul, utilizada no EVI, apresenta relação sinal/ruído muito baixa e não se encontra em muitos sistemas sensores.

O EVI proporciona uma sensibilidade melhorada em regiões de alta biomassa, minimizando as influências do solo e da atmosfera (HUETE et al., 2002). É limitado pelos sistemas sensores que não operam na região espectral do azul, o que torna difícil gerar, em longo prazo, séries temporais de EVI como são obtidas pelo NDVI. Assim, Jiang e colaboradores, em (2008), desenvolveram um novo índice de vegetação baseado no EVI, denominado de EVI2, que não utiliza a banda do azul.

A banda do azul, utilizada no EVI, tem a finalidade de reduzir o ruído e os efeitos associados aos aerossóis atmosféricos. O EVI2 é funcionalmente equivalente ao EVI, embora seja ligeiramente mais propenso a ruído de aerossol, mas, com os avanços contínuos das técnicas de correções atmosféricas, essa evidência torna-se menos significativa ao longo do tempo (JIANG et al., 2008). O EVI2 pode revelar a dinâmica de diferentes tipos de vegetação, especialmente quando valores de reflectâncias na banda do vermelho são baixos, e o NDVI torna-se saturado (JIANG et al., 2008).

Sequestro de Carbono (CO₂flux)

O sequestro florestal do carbono pode ser definido por Brow (1997) como o fluxo entre a atmosfera e os ecossistemas terrestres ao longo do tempo, o que corresponderia à queima de combustíveis fósseis liberando carbono para a atmosfera ou o crescimento de plantas absorvendo o carbono atmosférico para o estoque terrestre, ou seja, uma ação que está absorvendo carbono é chamada de poço (sink) e que estiver liberando carbono é chamado de fonte (source), nesse contexto, as florestas são consideradas como poços de carbono (carbon sinks). Para o sensoriamento remoto, o sequestro florestal de carbono é definido por meio dos índices de vegetação, entre os quais, destaca-se o NDVI e notadamente que trata a respeito do CO₂flux.

Fuentes et al. (2006), usando modelos simples derivados da reflectância espectral, mapearam os padrões de CO₂flux no ecossistema do semiárido no sul da Califórnia (Estados

Unidos), com sensor AVIRIS, combinando índices de vegetação derivados das imagens de satélite com os fluxos de CO₂ e vapor de água, obtidos para a região em torno da torre. Os autores apresentaram resultados satisfatórios para a alta correlação dos índices PRI e NDVI entre os valores do fluxo modelado.

Cerqueira e Franca-Rocha (2007), analisando a correlação entre o sequestro de carbono com CO₂flux no Bioma Caatinga, apontaram a fragilidade no método convencional de quantificação do carbono na vegetação, uma vez que cada vegetação possui características fitossociológicas específicas. Também verificaram que existiam diferenças significativas entre os tipos de vegetação estudados no que tange ao fluxo de CO₂.

Wylie et al. (2007) estudaram os fluxos de CO₂ em pastagens, a partir de cinco torres de fluxo nas Grandes Planícies do Norte. As medições foram combinadas com dados espaciais de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), NDVI, temperatura, precipitação e características do solo. Os resultados apontam que a série temporal é muito curta para fornecer uma estimativa mais definitiva do estado ou tendências nos fluxos de carbono na região.

Baptista e Munhoz (2009) analisaram, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral, o comportamento da vegetação pelos índices de CO₂flux, I CO₂ e conteúdo de umidade da vegetação, em ambientes localizados no Pantanal de Nhecolândia (MS). Os resultados apontam que os índices utilizados foram satisfatórios para a vegetação terrestre, mas insuficientes com relação aos ecossistemas aquáticos.

Coltri et al. (2009), em uma fazenda no município de Ribeirão Corrente (SP), avaliaram as correlações entre índices espectrais (NDVI, PRI e CO₂flux) e parâmetros agronômicos (índice de área foliar (IAF) e biomassa (B)) representativos da cultura do café arábica, visando encontrar relações de estoque e sequestro de carbono. Os resultados mostraram que as correlações foram classificadas em uma escala de muito fracas a muito fortes, considerando os valores dos índices e as estimativas de biomassa. Dentre os índices, o CO₂flux teve correlação fraca a moderada com a quantidade calculada de carbono estocado, tanto pelo sensor Quickbird, quanto pelo sensor Landsat.

Pedroza da Silva e Baptista (2013), analisando as variações na modelagem do sequestro florestal de carbono por meio de dados hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós (PA), observaram nuances de atividade fotossintética a partir dos índices NDVI, EVI e EVI2. Quando são correlacionados os índices de sequestro de carbono com o I CO₂,

utilizando o NDVI para a estrutura do CO₂flux, os resultados mostram uma alta correlação de 0,84. Porém os índices EVI e EVI2 também apresentam elevados coeficientes de correlação, com a vantagem de incorporarem a minimização de efeitos de saturação, background e atmosféricos.

Martins e Baptista (2013) analisaram os aspectos multitemporal do desmatamento no Projeto de Assentamento Carão (AC), por meio da análise do sequestro florestal de carbono obtido a partir do índice espectral CO₂flux. Os resultados mostraram que o mapeamento do sequestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese, mostrou-se ser mais eficiente para a avaliação do ritmo temporal de ocupação e de supressão da floresta nativa.

Aplicações com Dados Hyperion

Para Miura et al. (2003), a utilização de dados Hyperion melhorou a discriminação da caracterização biofísica e fisionomias do Cerrado, utilizando índices de vegetação. Resultados mostram que as assinaturas hiperespectrais do Hyperion descreveu claramente as diferenças entre pasto, mata de galeria, e as outras quatro fisionomias de cerrado. Do mesmo modo, estas características espectrais foram consideradas correspondendo bem com características biofísicas (frações de cobertura). Essas análises preliminares mostraram um grande potencial das imagens Hyperion, tanto na caracterização biofísica, quanto para a discriminação da cobertura da terra no Cerrado.

O sensoriamento remoto pode fornecer diversas medidas de propriedades da vegetação. Só recentemente têm sido utilizadas as tecnologias colocadas em órbita para estudos em larga escala da dinâmica dos ecossistemas. Apesar de suas limitações, o sensor Hyperion possibilita uma variedade de medidas das propriedades estruturais, bioquímicos e fisiológicos sensíveis a copas das árvores (ASNER et al., 2005a).

A aplicabilidade das imagens Hyperion vem avançando gradativamente no Brasil. Muitos autores utilizam as imagens do sensor a fim de verificar o potencial para analisar diversas feições na superfície terrestre, aplicando inúmeras técnicas de processamento.

Ramsey III et al. (2005), utilizando imagens do Hyperion e combinação de técnicas de extração de subpixel, conseguiram desenvolver uma metodologia para detectar a ocorrência de uma espécie de árvore invasora (*Triadica sebifera*) no sul-leste dos Estados Unidos. Devido às baixas ocorrências percentuais da espécie e alta covariação espectral no

meio ambiente, foram implementados métodos de validação e verificação, contando com a coleta simultânea de espectros de reflectância no campo e posterior classificação de composições do dossel.

Galvão et al. (2005) utilizaram dados do sensor Hyperion para testar sua potencialidade quanto à discriminação de cinco variedades brasileiras de cana-de-açúcar no sudeste brasileiro. Como resultados dessa pesquisa, os autores chegaram à conclusão de que os dados de campo e os dados resultantes da classificação das imagens por análise discriminante demonstraram o potencial dos dados coletados pelo sensor Hyperion.

Asner et al. (2005a), com dados do sensor Hyperion, analisaram a relação da precipitação anual e idade do substrato a fim de avaliar e comparar com os índices de vegetação, NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada), NDWI (índice de água por diferença normalizada), CRI (índice de carotenóides) e PRI (índice de reflectância fotoquímica) sobre o dossel das florestas tropicais da ilha do Havaí. Os resultados mostraram que a estrutura bioquímica e fisiológica do dossel de uma floresta tropical havaiano varia junto com as condições de precipitação e o gradiente de idade do substrato. Os autores sugerem que esse estudo pode ser passível de aplicação em outras áreas em condições semelhantes no trópico úmido, inclusive na bacia amazônica.

Schramm e Vibrans (2007) utilizaram dados do Hyperion para identificar e descrever a resposta espectral das diversas formas da cobertura vegetal natural e de algumas culturas agrícolas na bacia do Itajaí. Os resultados mostraram que o uso de imagens hiperespectrais possibilitou a nítida diferenciação das formações florestais e culturas agrícolas, o que significa um avanço em relação ao uso de imagens multiespectrais.

Para Tisot et al. (2007), os dados hiperespectrais Hyperion/EO-1 possuem uma grande importância na discriminação de classes de uso e cobertura do solo e também para alvos agrícolas com características espectrais semelhantes (cana-de-açúcar). Os autores compararam a acurácia de classificação obtida pelo sensor ETM+/Landsat-7 e Hyperion. Os resultados mostraram que a acurácia foi de 91,5% para as classes de uso e cobertura do solo e 67,6% para as classes de variedades de cana-de-açúcar, com dados classificados a partir do sensor ETM+, enquanto que, para os dados do sensor Hyperion, a acurácia de classificação foi de 94,9% e de 87,1%, respectivamente.

Linn em 2008, demonstrou a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto (MNF - *Minimum Noise Fraction*, PPI - *Pixel Purity Index* e visualizado *n*-Dimensional) aplicados aos

dados do sensor Hyperion para identificação de determinados alvos, inclusive na diferenciação de vegetação (pinus, eucaliptos e gramíneas). Os resultados demonstraram o potencial da aplicação das técnicas, mesmo considerando a baixa relação sinal/ruído dos instrumentos, especialmente no infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Em 2009, Souza realizou o estudo das fitofisionomias de Cerrado utilizando dados hiperespectrais do sensor Hyperion para a análise espectral, estimativa de parâmetros biofísicos e para a discriminação de fitofisionomias do bioma Cerrado na região de Pirenópolis (GO). A análise espectral das fitofisionomias foi feita com base na técnica por componentes principais e na inspeção visual de espectros. Os resultados obtidos permitiram concluir que a similaridade estrutural das fitofisionomias se refletiu na similaridade espectral das mesmas e na confusão das classes nas classificações. Os resultados do estudo demonstram que dados hiperespectrais podem melhorar a classificação e o mapeamento das fitofisionomias de Cerrado, em relação aos dados multiespectrais tradicionais, possibilitando o cálculo de índices de vegetação de bandas estreitas que são altamente correlacionados com parâmetros biofísicos.

Galvão e colaboradores, em 2009, realizaram um estudo para avaliar as relações entre 17 índices de vegetação, calculados a partir de dados Hyperion/EO-1 obtidos com visada fora do nadir na direção do retro espalhamento, e a produtividade de três variedades de soja plantadas em 2005-2006 em uma fazenda localizada no estado do Mato Grosso. Os resultados preliminares da análise das relações entre razões de bandas e índices de vegetação de bandas estreitas mostraram que as melhores correlações com produtividade foram obtidas: (a) com razões de bandas IVP/IVP; e (b) com índices sensíveis ao conteúdo de água das folhas. Em concordância com a análise da razão de bandas, NDWI apresentou a melhor correlação com produtividade.

No trabalho de Bisso (2010), os dados do sensor Hyperion representaram uma nova abordagem metodológica e complementaram a análise do meio ambiente realizada pelos métodos multiespectrais na diferenciação de Mata Atlântica e de bananais no município de Três Cachoeiras, maior produtor de banana do estado do Rio Grande do Sul.

A disponibilidade de dados hiperespectrais trouxe para discussão quanto à potencialidade de sua aplicação no setor florestal. O trabalho realizado por Canavesi et al. (2010) avaliou a aplicação de dados hiperespectrais do sensor Hyperion EO-1 na quantificação da variável biofísica volume de madeira em plantios de *Eucalyptus* spp. e o

impacto do sombreamento do relevo nessa quantificação. O estudo resultou em modelos com maiores valores de R^2 quando compensados os efeitos topográficos de iluminação, comprovando maior potencial de aplicação desses dados em estudos de florestas.

Papes et al. (2010), usando imagens de satélite hiperespectral para inventários regionais com árvores emergentes na Bacia Amazônica, chegaram à conclusão de que os dados do sensor Hyperion têm potencial para o desenvolvimento mapeamento regional de árvores tropicais.

Em 2011, Breunig e colaboradores, em um estudo de caso, utilizaram dados do sensor Hyperion e simulações de outros sensores multiespectrais e técnicas diferenciadas para classificar seis variedades de soja. Quando a simulação da resolução espectral de sensores multiespectrais foi realizada, MODIS / Terra e ETM + / Landsat-7 apresentou os maiores valores de acurácia de classificação (86,72% e 85,94%, respectivamente), enquanto que o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) / NOAA-17 (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) apresentou o menor valor (68,85 %). A classificação derivada do AVHRR / NOAA-17 foi afetada pela sua baixa resolução espectral e ausência de bandas no SWIR. Neste contexto, a simulação da resolução espectral dos dados do Hyperion para sensores multiespectrais podem influenciar de forma positiva os resultados da classificação por causa da atenuação de ruído devido à redefinição da resolução espectral. Os resultados do estudo indicaram a importância das bandas Hyperion para discriminar as cinco variedades de soja estudadas.

De acordo com Vicente et al. (2011), é possível verificar a estimativa de propriedades biofísicas no mapeamento de pastagens utilizando dados do sensor EO1-Hyperion. A utilização de imagens do sensor aliada ao modelo linear de mistura espectral foi capaz de discriminar áreas de pastagens antrópicas em meio às formações de cerrado do Pantanal brasileiro, demonstrando a viabilidade da estimativa de parâmetros biofísicos do alvo. Assim, os autores apresentaram uma proposta de metodologia que possui potencial para contribuir na identificação de áreas de pastagens degradadas e monitorar possíveis intervenções antrópicas de recuperação desses locais.

Para Vyas et al. (2011), a classificação da vegetação com o uso de sensoriamento remoto hiperespectral é encorajadora para a discriminação de espécies florestais tropicais. Sabe-se que os dados hiperespectrais gera um problema clássico de *inputs* de alta dimensão. Por esse motivo, os autores avaliaram no seu estudo o desempenho de três classificadores

diferentes (Rede Neural Artificial, *Spectral Angle Mapper*, *Support Vector Machine-SVM*) para a diversidade da floresta tropical. A análise resultou na identificação de 22 melhores bandas para discriminar oito classes de vegetação tropical.

Petropoulos et al. (2012) avaliaram o desempenho do sensor Hyperion em conjunto com os dois algoritmos de classificação diferentes para delinear o uso e cobertura da terra. Os resultados reforçam o potencial de dados de sensoriamento remoto hiperespectral, juntamente com uma abordagem de classificação baseada em objetos para o mapeamento de uso e cobertura da terra mapeamento nas regiões mediterrânicas.

Para Galvão et al. (2013), a vantagem do Hyperion (EO-1) está na sua resolução temporal e aplicações de índices de vegetação para estudar a fenologia das florestas tropicais da Amazônia. De acordo com suas análises, os resultados mostraram-se um progresso para o (EVI) e (PRI). Os resultados enfatizaram a importância de se levar em conta os efeitos bidirecionais ao analisar séries temporais ao longo das florestas tropicais devido aos efeitos de iluminação que variam de acordo com a estrutura do dossel, composição da floresta, tempo e período de aquisição de dados.

As imagens do sensor Hyperion demonstram grande potencial para utilização na investigação dos recursos naturais, mas se faz necessário aplicar novas técnicas para explorar diferentes respostas espectrais na superfície na Terra e na atmosfera.

III. Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

A região amazônica é delimitada nove países (Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela), representando um patrimônio com mais de 6,5 milhões de km². A maior parte da área, cerca de 60%, está concentrada no Brasil. Essa parcela é denominada Amazônia Legal e ocupa 59% do território brasileiro, englobando os estados da macrorregião Norte (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins), Mato Grosso (macrorregião Centro-Oeste) e parte do Maranhão, a oeste do meridiano 44^o, na macrorregião Nordeste (Figura III-1).

Figura III-1. Amazônia Brasileira.



É constituída pela bacia hidrográfica do rio Amazonas situada no território nacional, além dos rios existentes na Ilha de Marajó e no estado do Amapá que deságuam no Atlântico Norte (Resolução CNRH n° 32, de 15 de outubro de 2003), perfazendo um total de 3.869.953 km² (ANA, 2014).

A morfologia dos leitos dos rios e a estrutura das planícies inundáveis na bacia amazônica são geralmente influenciadas pelas diferenças nas propriedades químicas e físicas da água. Os rios podem ser classificados em três principais categorias: rios de águas pretas, rios de águas claras e rios de águas brancas (SIOLI, 1975).

Os rios de águas pretas, como os rios Negro, Tefé, Cuieiras, Cururu, Jutaí e muitos dos seus afluentes, originam-se nas terras baixas do Terciário da Amazônia. Suas águas são escuras por causa do alto conteúdo de húmus dissolvido e do baixo nível de sedimentos, com baixo teor de nutrientes, esses rios servem de suporte para as florestas de igapó (JUNK, 1984). Os rios de águas claras, como o Xingu, Jari, Tapajós e Araguaia, têm suas origens nos sedimentos do Cretáceo dos Escudos das Guianas e Brasileiro. Os rios de águas claras têm maior variação na quantidade de sedimentos que os rios de águas pretas. Os rios de águas brancas (rio Amazonas, Madeira, Purus e Juruá) carregam muito sedimentos, frequentemente originado dos Andes e encostas Pré-Andinas. Esse sedimento é depositado nas terras baixas, criando extensas planícies inundáveis de águas brancas ou várzeas (AYRES, 2006).

Nas águas claras, pretas ou brancas, dos rios que drenam a Bacia Amazônica, correm 1/5 de toda a água doce do Planeta. Seus caudalosos rios são condicionados pelo regime das chuvas que caem na região que, por sua vez, dependem da circulação atmosférica dentro da zona intertropical sulamericana e dos deslocamentos das massas de ar (CÁUPER, 2006).

A região amazônica apresenta o clima do tipo Am que, segundo classificação de Köppen, é caracterizado como quente e úmido, com precipitação acima de 2.000 mm por ano, com período relativamente seco (junho a outubro) e com chuvas torrenciais bem distribuídas o ano todo. A temperatura média anual gira em torno de 25°C (IBGE, 2013).

Abriga uma infinidade de espécies vegetais e animais: 1,5 milhão de espécies vegetais catalogadas; 3 mil espécies de peixes; 950 tipos de pássaros; e ainda insetos, répteis, anfíbios e mamíferos (ANA, 2014).

A geomorfologia da Amazônia é bastante variada, e grande parte da região encontra-se em altitudes abaixo de 200m, com a presença de planaltos, planícies e depressões (SCHUBART, 1983). A planície sedimentar Terciária na área é dissecada por sua rede de drenagem, resultando em platôs (de 500 a 1.000 metros de diâmetro), colinas de topos arredondados e vales amplos circundados por vertentes íngremes retas e convexas. A

altitude relativa entre os vales e os platôs varia entre 50 a 100 metros (RANZANI, 1980). A planície amazônica central é excepcionalmente plana, o que leva a cheias anuais dos rios principais de 7 a 9 metros durante parte do ano (LEOPOLDO et al., 1987).

Estudos envolvendo o relevo e a vegetação são de grande importância para o entendimento da dinâmica e da formação da Floresta Amazônica (BISPO et al., 2009). A fisionomia e a estrutura da floresta apresentam variações em função do ambiente em que ela se encontra. É mais exuberante nas áreas de baixadas com relevo ondulado e/ou rampas, mais próximas das drenagens onde, geralmente, mostra uma altura entre 30 a 40 m, árvores relativamente grossas e dossel emergente. As áreas de interflúvios de relevo plano exibem uma altura entre 18 a 25 m, árvores bem mais finas e dossel uniforme (IBGE, 2012).

De acordo com Bispo et al. (2009), na classificação de vegetação proposta por Veloso et al. (1991) e utilizada no RADAMBRASIL, a caracterização do relevo é parte integrante da especificação das formações vegetais, como as florestas aluviais, de terras baixas, submontana e, montana (Figura III-2).

Figura III-2. Formações vegetais e sua relação com o relevo.



Fonte: IBGE (2012).

Devido à grande variação das condições ambientais, a região amazônica não é inteiramente contínua, embora apresente uma paisagem uniforme, floristicamente é bastante heterogênea. Assim é conhecida mundialmente pela quantidade de ecossistemas que possui, como matas de terra firme, florestas inundadas, várzeas, igapós, campos abertos e cerrados (LENTINI et al., 2003).

Os principais tipos de vegetação da Amazônia desenvolveram-se a partir das mudanças geológicas mais importantes acontecidas durante os períodos Terciário e Quaternário (AYRES, 2006).

Os mais importantes tipos de vegetação amazônica podem ser divididos em grupos distintos de tipo de relevo, a partir de classificações proposta por Pires e Prance de 1985 (AYRES, 2006):

- As florestas densas (matas primárias) podem ser subdivididas em duas grandes categorias: florestas de terra firme, localizadas em terras mais altas e as florestas inundáveis.
- As florestas de terra firme ocupam maior parte da área total da Amazônia e encontram-se quase que 70% de solos do tipo latossolo amarelo e vermelho;
- As florestas em áreas inundáveis representam de 5 a 10% da bacia Amazônica, estão geralmente situadas nas áreas ao longo dos rios. Essas florestas são conhecidas como florestas de várzea e igapó: as várzeas estão sujeitas a períodos curtos de inundação por águas brancas. Os solos de várzea são constantemente renovados, pois ficam submersos nas águas brancas por quase metade do ano. As florestas de igapó são florestas inundadas permanentemente ou por um período sazonal mais longo, localizadas nos rios de águas claras e de águas pretas;
- As campinaranas são florestas sobre solo arenoso, comuns na bacia do rio Negro e caracterizadas por vegetação escleromófica, pobre e baixa. Possuem trechos arenosos abertos e sem cobertura;
- As florestas de montanha situam-se em áreas elevadas e são abundantes na parte setentrional da Amazônia, entre o Brasil, Venezuela e Guiana. Essas florestas localizam-se entre 800 e 2600m, à medida que aumenta a altitude, a biomassa diminui;
- Embora as florestas densas sejam a vegetação dominante na Amazônia, existem algumas áreas onde trechos de savanas são comuns. A savana de terra firme é muito similar ao Cerrado, contudo sua composição botânica apresenta numerosas espécies endêmicas.

A maior parte (64%) da cobertura vegetal da Amazônia Legal é floresta. Os cerrados e campos representam 24%, enquanto cerca de 10% da Amazônia estão alteradas pela ação antrópica (a maioria, área desflorestada) (LENTINI et al., 2003).

As ações antropogênicas na Amazônia iniciaram na década de 70, a partir implantação do Programa de Integração Nacional (PIN), a construção de estradas esteve relacionada ao desenvolvimento e a projetos de colonização estabelecidos pelo Instituto

Nacional de Colonização e Reforma Agrária, principalmente na porção mais ao sul da região, nas proximidades de Mato Grosso e Rondônia (BATISTELLA; MORAN, 2005).

Reconhecida como a maior floresta tropical existente, a Amazônia corresponde a 5% da superfície terrestre, o equivalente a 2/5 da América do Sul, e ocupa cerca de 1/3 das reservas de florestas tropicais úmidas e é o maior banco genético do planeta (CÁUPER, 2006).

Possui um grande patrimônio mineral ainda não mensurado, além de ser um ecossistema de importância inestimável para o planeta, sendo também um grande sorvedouro de carbono, contribuindo para o equilíbrio climático global (IBGE, 2013).

Sítios Experimentais

O estudo foi realizado na região amazônica, especificamente em cinco ambientes, envolvendo áreas naturais e de influências antrópicas, onde estão localizadas as torres micrometeorológicas do Programa LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*).

Programa LBA

O programa LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), por meio de pesquisa multi e interdisciplinar, busca compreender de que modo a Amazônia funciona e como as mudanças de uso da terra e clima afetarão as funções química, física e biológica da Amazônia, incluindo a sustentabilidade de desenvolvimento na região e a influência da Amazônia no clima global (D'AMELIO, 2006).

O LBA, sob a coordenação científica do INPA, é uma das maiores experiências científicas do mundo na área ambiental. Possui cerca de 156 projetos de pesquisa, desenvolvidos por 281 instituições nacionais e estrangeiras. A publicação dos resultados de pesquisa faz parte da história de sucesso do LBA.

Os resultados integrados, obtidos pelas diferentes equipes de cientistas, têm permitido entender alguns mecanismos que governam as interações da floresta com a atmosfera, tanto em condições naturais (da floresta intacta), quanto em áreas alteradas.

O LBA tem contribuído para melhorar os modelos de previsão climática; medir as emissões de carbono das hidrelétricas na Amazônia e o potencial uso do metano para

geração de energia elétrica adicional nas usinas; realizar novas medidas reais de densidade da madeira no sul da Amazônia, mostrando que a biomassa acumulada é menor do que em estimativas anteriores (LBA, 2014).

São focados na análise dos impactos das alterações de uso do solo na Amazônia em diversos aspectos do funcionamento do ecossistema: clima físico, ciclagem de nutrientes, ciclagem de carbono e química atmosférica (LBA, 2011).

Entre seus objetivos específicos, estão:

- Investigar os impactos climáticos decorrentes das alterações de uso do solo na Amazônia.
- Medir o fluxo líquido de carbono em florestas primárias, secundárias, áreas alagadas e em áreas de pastagem com diferentes padrões ambientais.
- Medir o fluxo de carbono, como CO₂ e outras espécies em grande escala, utilizando medidas em aeronaves e técnicas meteorológicas de grande escala.
- Medir a sazonalidade do fluxo de carbono e suas forçantes climáticas¹ nas torres das áreas experimentais em Caxiuanã, Bragança, Pará, Manaus, Rondônia, Ilha do Bananal e norte de Mato Grosso.
- Estudar as alterações nos mecanismos de formação de nuvens na Amazônia decorrentes do desmatamento e suas implicações climáticas regionais.

¹ O clima da superfície terrestre é determinado por uma gama de interações complexas entre a atmosfera, oceano e continentes que envolvem processos físicos, químicos e biológicos. A estabilidade do clima global depende basicamente do equilíbrio radiativo do sistema terra-atmosfera-oceano, ou seja, o fluxo de radiação solar, ou radiação de ondas curtas, absorvido pelo Planeta deve ser igual ao fluxo de radiação infravermelha térmica, ou radiação de ondas longas, emitida pela superfície e atmosfera para o espaço exterior. As forçantes climáticas, que controlam esses fluxos, são de natureza interna e externa ao sistema terra-atmosfera-oceano. As forçantes internas são os processos inerentes ao sistema terra-atmosfera-oceano e que estão submetidas a mecanismos de compensação ou realimentação do sistema, denominados “*feedbacks*”. Esses podem ser negativos, quando tendem a se opor a uma perturbação climática e restabelecer o estado de equilíbrio original. São considerados positivos, quando amplificam a perturbação climática e levam o clima a um estado de equilíbrio distinto do original. As Forçantes externas são processos físicos e químicos que ocorrem independentemente dos processos do sistema terra-atmosfera-oceano, ou seja, variações climáticas não têm influência alguma sobre as forçantes externas. Essas forçantes afetam, primeiramente, o fluxo de radiação solar que atinge o Planeta Terra. Porém, é possível que outras forçantes, como forças gravitacionais, radiação solar e aerossóis vulcânicos também tenham um papel relevante nas alterações climáticas (MOLION, 2007). As forçantes provavelmente as mais importantes durante o último milênio foram as mudanças na produção de energia a partir do sol, erupções vulcânicas, e as mudanças na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (NCDC-NOAA, 2012).

- Determinar o impacto das emissões de poluentes sobre a saúde da população provocada pelas queimadas na Amazônia. Avaliar os danos ao ecossistema proveniente das concentrações de ozônio e material particulado.
- Medir o fluxo de compostos orgânicos voláteis, aerossóis carbonáceos e material orgânico na chuva, e estimar sua importância na ciclagem de carbono.
- Avaliar o impacto de mudanças de uso do solo sobre a qualidade da água em bacias hidrográficas de micro e mesoescala em Rondônia.
- Fortalecer grupos de pesquisas ambientais da região Amazônica, nas universidades e institutos de pesquisa, com cursos de formação e disseminação técnico-científica.

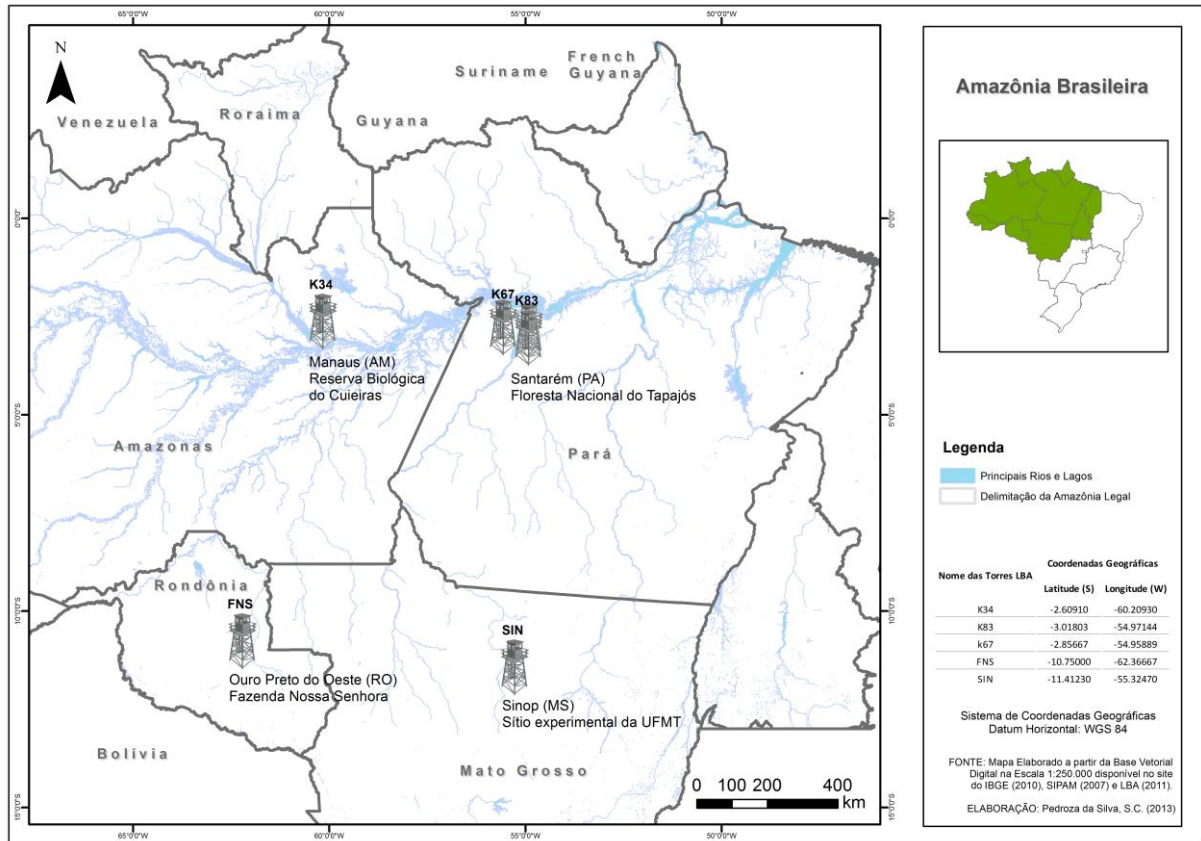
O LBA tem hoje 13 torres de medições de fluxo de CO₂ operando continuamente no Brasil, abrangendo muitos usos da terra e tipos de ecossistemas por toda Amazônia e também no cerrado do Centro-Oeste.

Cinco torres estão instaladas no estado do Pará. No estado do Amazonas, duas torres de floresta primária operam, ambas na Reserva de Cuieiras, em Manaus. No estado de Rondônia, também, duas torres estão em operação, sendo uma de floresta primária, em Ji-Paraná e uma de pastagem, em Ouro Preto d'Oeste. No estado de Mato Grosso, uma torre de floresta primária de transição ou Floresta Amazônica seca, em Sinop e no Distrito Federal, três torres, todas em Brasília, sendo uma de cerrado "*stricto sensu*" e duas de recuperação da vegetação de cerrado depois de queimadas (LBA, 2011).

Caracterização dos Sítios Experimentais

No estudo, foram utilizadas cinco torres, denominadas de K34, localizadas no estado do Amazonas; K83 e K67, no Pará; FNS em Rondônia e SIN no Mato Grosso, pertencentes ao Programa LBA (Figura III-3).

Figura III-3. Localização das cinco torres micrometeorológicas do Programa LBA.



Os sítios experimentais do Amazonas e Pará estão inseridos em Unidades de Conservação, e as torres de Rondônia e Mato Grosso estão sob a responsabilidade da Universidade de Rondônia, no Campus de Ji-Paraná e da Universidade Federal do Mato Grosso, respectivamente (Tabela III-1).

Tabela III-1. Torres de Fluxo de CO₂ na Amazônia Brasileira.

N.º de Torre	Estado	Município	Localidade	Sítios	Nome da Torre	Coordenadas Geográficas (decimal)	
						Latitude (S)	Longitude (W)
1	Amazonas	Manaus	Reserva Biológica do Cuieiras	Floresta Primária	K34	2,60910	60,20930
2	Pará	Santarém	Floresta Nacional do Tapajós	Exploração Seletiva de Madeira	K83	3,01803	54,97144
3			Floresta Nacional do Tapajós	Floresta Primária	K67	2,85667	54,95889
4	Rondônia	Ouro Preto do Oeste	Fazenda Nossa Senhora	Pastagem	FNS	10,75000	62,36667
5	Mato Grosso	Sinop	Sítio experimental da UFMT	Floresta de Transição (Floresta Úmida e Cerrado)	SIN	11,41230	55,32470

Fonte: LBA, 2011.

Sítio Experimental da Torre K34

A torre K34 localiza-se nas proximidades da cidade de Manaus, na Reserva Biológica do Cuieiras que possui cerca de 22.735 ha. A Reserva pertence ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). A unidade experimental encontra-se a cerca de 60 km ao norte de Manaus, pela rodovia BR 174, na área da Estação Experimental de Manejo Florestal do INPA, cerca de 34 km de ramal de estrada de barro.

De acordo com Santos (1999), a área é plana, entretanto é recortada por numerosos igarapés. O tipo de solo predominante é latosolo amarelo e tem alto conteúdo de argila (80%), baixo conteúdo nutricional, baixo pH (4.3) e uma porosidade alcançando de 50 a 80%. Possui temperatura média de 26°C (mínima 19°C e máxima 39°C). A precipitação anual varia de 1.800 a 2.800 mm, com uma estação chuvosa de dezembro a maio e uma estação seca de junho a novembro; os meses mais chuvosos são março e abril (> 300 mm de chuvas) e os mais secos, julho, agosto e setembro (< 100 mm).

Na Reserva do Cuieiras, a interceptação da chuva pela floresta é de 25,6% e a transpiração da floresta é de 48,5%, produzindo, então, uma evapotranspiração de 74,1%, (LEOPOLDO et al. 1987). O dossel é bastante uniforme com cobertura florestal predominante conhecida como Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas (IBGE, 2012).

A torre foi erguida em 1999 em um platô de tamanho médio, em ambiente de floresta primária e em uma altitude de 130m. Possui 55 metros de altura e está atualmente coletando dados meteorológicos de concentração e fluxo de CO₂. A altura média do dossel nessa área é de aproximadamente 35m. O sítio experimental possui ainda uma infraestrutura (alojamentos, cozinha, banheiros e área social) para abrigar os pesquisadores (Figura III-4).

Figura III-4. Torre K34 do Programa LBA. a) acesso pela rodovia BR-174; b) e c) ramal de barro, a cerca de 34 km da Reserva; d) placa da Reserva Experimental do INPA; e) e f) acesso de 2,5km pela floresta para base da torre; g) torre K34 com 55 metros de altura; h) dossel da floresta primária; i) alojamento da Reserva.



a



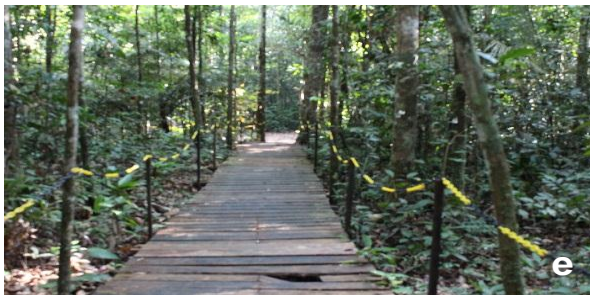
b



c



d



e



f



g



h



i

Fonte: Dados de Campo (2013).

Sítio Experimental da Torre K83 e K67

A Floresta Nacional do Tapajós possui cerca de 560.000 ha, situa-se próxima à foz do rio Tapajós, abrangendo áreas dos municípios de Belterra, Aveiro, Rurópolis e Placas, estado do Pará. É limitada geograficamente a oeste pelo rio Tapajós, a leste pela Rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163). As torres (K83 e K67) localizadas em Santarém (PA) foram instaladas a aproximadamente 5 e 6 km, respectivamente de distância, em linha reta da rodovia. É uma unidade do sistema de florestas nacionais administrada pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), criada pelo Decreto no. 73.684, de fevereiro de 1974 (HENRIQUES et al., 2008).

O clima da região é do tipo Am - tropical úmido de monção, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 25,5 °C. A precipitação média anual está em torno de 1.800 mm e umidade relativa de 86%. De acordo com D'Amelio (2006) a estação chuvosa está compreendida entre os meses de janeiro a julho, quando a precipitação é acima de 50mm, e a estação seca ocorre entre os meses de agosto a dezembro, sendo mais acentuada nos meses de agosto a outubro.

O relevo é plano ou dissecado, as superfícies de aplainamento são inundadas periodicamente por ocasião das chuvas. A altitude média é de 175 m, com solo predominante do tipo latossolo amarelo distrófico, segundo classificação do RADAMBRASIL (IBAMA, 2004).

De acordo com Veloso (1991), a vegetação é classificada como Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, caracterizando-se pela dominância de indivíduos arbóreos de grande porte e pela abundância de lianas lenhosas, palmeiras e epífitas.

A torre K83 situa-se em ambiente de floresta de exploração seletiva de madeira e tem um dossel com cerca de 30m de altura (Figura III-5).

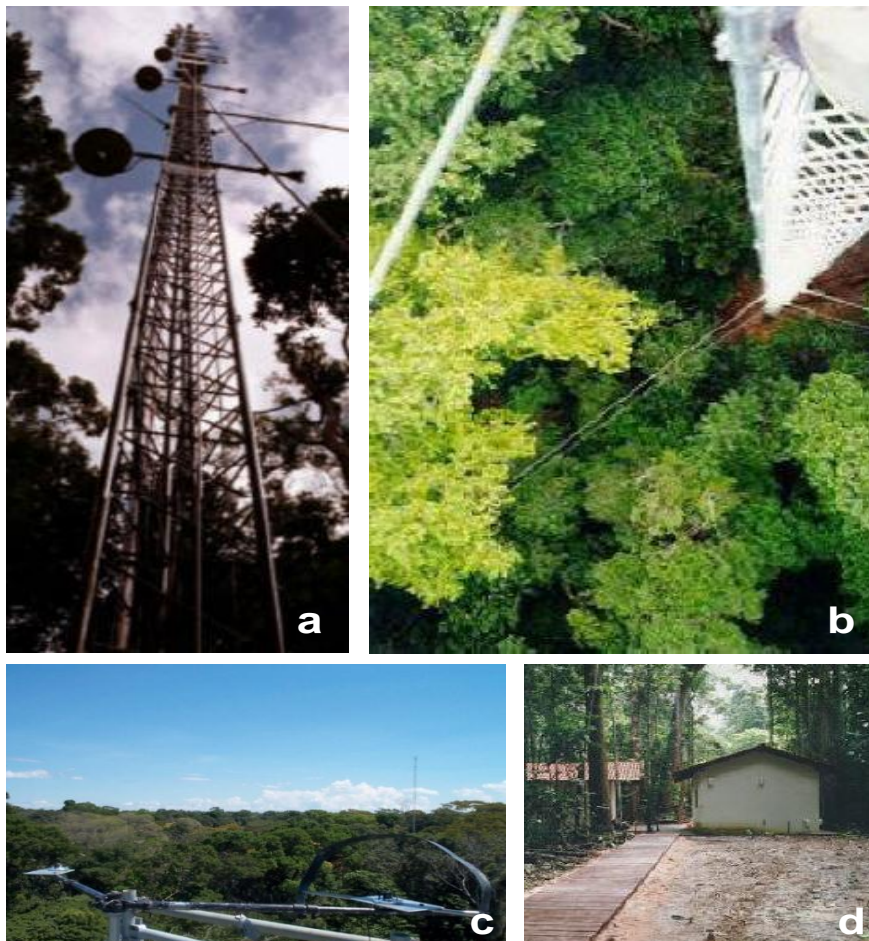
E a torre k67 situa-se em floresta primária e possui 64 metros de altura (Figura III-6).

Figura III-5. Vista e instrumentos posicionados na parte superior da torre k83, FLONA Tapajós.



Fonte: Miller et al. (2009).

Figura III-6. Torre K67 do Programa LBA. a) vista da torre K67 com 64m de altura; b) sub-bosque da floresta vista de cima; c) vista do dossel da floresta e d) sala climatizada com equipamentos.



Fonte: Hutyra et al. (2008).

Sítio Experimental da Torre FNS

A Torre FNS está localizado na Fazenda Nossa Senhora no município de Ouro Preto d'Oeste nas proximidades da rodovia BR-163, a cerca de 50 km de Ji-Paraná, na região sudoeste de Rondônia.

A torre está instalada em um platô cercado por pastagem em uma altitude de 293m acima do nível do mar (Figura III-7).

Figura III-7. Torre FNS do Programa LBA. a) vista da torre FNS com 8 metros de altura; b e c) vista do ambiente de pastagem que circunda a torre.



Fonte: Dados de Campo (2013).

De acordo com Von Randow et al. (2004), essa região não sofre influência do mar ou da topografia, e a temperatura apresenta-se constante ao longo do ano. Eventualmente frentes frias penetram do sul da América do Sul durante os meses de junho e julho, causando “friagem”.

A predominância do clima é equatorial, quente e úmido, entre 23 e 24°C, a precipitação varia fortemente nas estações, nos meses de novembro a abril é de 2000 mm, e durante a período de seca de junho a agosto, é comum observar muitas semanas sem chuva.

Os ventos locais são predominantemente de norte durante todo ano, mas com eventos vindos do sul em junho e julho associados à friagem (ZANCHI et al., 2002).

O solo classificado como podzol vermelho-amarelo é profundo até atingir a parte rochosa (7m) e tem uma textura arenosa na superfície, aumentando a porcentagem de argila com a profundidade (ZANCHI et al., 2009).

Na Fazenda Nossa Senhora, a área estudada foi desflorestada com fogo em meados da década de 70 (RANDOW et al., 2004). A partir de 1977, foram cultivados arroz, feijão e mandioca, e, com a degradação do solo no início da década de 80, a área foi recoberta com *Urochloa brizantha* (também conhecida como *Brachiaria brizantha*) (ZANCHI et al., 2009).

Atualmente, a pastagem (Figura III-8) é formada principalmente por 99% de *Urochloa brizantha* e com uma pequena contribuição de *Panicum maximum* e *Urochloa humidicula* (ZANCHI et al., 2002).

Figura III-8. Áreas de Pastagens, nas proximidades da Torre FNS.



Fonte: Dados de Campo (2013).

Sítio Experimental da Torre SIN

A torre denominada de SIN está localizada a aproximadamente 50 km NE de Sinop (MT). A cobertura vegetal é caracterizada por uma Floresta de Transição Amazônia Cerrado (VOURLITIS et al., 2001), classificada pelo IBGE (2012) como Floresta Estacional Semidecidual Submontana.

A torre possui 40m de altura (Figura III-9) onde foram instalados equipamentos de medidas micrometeorológicas e um sistema de medidas de fluxo pelo método de covariância de vórtices turbulentos e pertencente ao Programa de Pós- Graduação em Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

Figura III-9. Torre SIN, localizada no sítio experimental da UFMT em Sinop (MT).



Fonte: Ferreira Filho (2004).

O clima da região é tropical quente e úmido, com temperatura média anual de 24°C com pequena variação nas estações seca e chuvosa, e uma precipitação média anual de 2000 mm (PRIANTE FILHO et al., 2004).

Possui formação geológica composta por coberturas não dobradas do Fanerozóico e Bacia Quaternária do Alto Xingu, Planalto Residual Norte de Mato Grosso e Planalto do Parecis, com altitude de 384 metros acima do nível do mar e uma importante rede hidrográfica formada pela Bacia do Amazonas, rio Teles Pires, importante afluente do rio Tapajós (IBGE, 2013).

O solo é classificado como um neossolo quartzarênico órtico típico A moderado álico, sendo um solo extremamente arenoso, que apresenta na, profundidade de 50 cm, uma textura com 84% de areia, 4% de silte e 12% de argila (PRIANTE FILHO et al., 2004).

Tipos de Ambientes e Fitofisionomia dos Sítios Experimentais

Tipos de ambientes e vegetação encontrados nos sítios:

Ambientes Naturais

- As torres K34 e K67 estão localizadas em ambiente de floresta primária. De acordo com IBGE (2012), essas florestas são chamadas de Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas;

- A torre SIN localiza-se em um ambiente de floresta de transição, denominada de Floresta Úmida e Cerrado ou Floresta Estacional Semidecidual Submontana (IBGE, 2012);

Ambientes Antropizados

- A torre K83 localiza-se dentro de um ambiente de exploração seletiva de madeira, onde predomina as Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas;
- A torre FNS localiza-se em uma fazenda com imensas áreas de pastagem, com cobertura vegetal predominante de gramíneas.

Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas

A Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas (IBGE, 2012) ou Floresta Tropical Úmida (RIBEIRO et al., 1999) também conhecida por Floresta de Terra Firme, termo regional utilizado por Braga (1979), é um tipo florestal predominante na região amazônica e possui aproximadamente 300 milhões de hectares.

Esse tipo de vegetação é caracterizado por plantas fanerógamas de médio e grande porte, além de lianas lenhosas e epífitas em abundância, que o diferenciam das outras classes de formações. Porém sua característica ecológica principal reside nos ambientes ombrófilos que marcam muito a “região florística florestal”. Assim, a característica ombrotérmica da Floresta Ombrófila Densa está presa a fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas (médias de 25° C) e de alta precipitação, bem distribuída durante o ano, o que determina uma situação bioecológica praticamente sem período biologicamente seco (IBGE, 2012).

A Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas é uma formação que, em geral, ocupa as planícies costeiras, capeada por tabuleiros pliopleistocênicos do Grupo Barreiras. Ocorre desde a Amazônia, estendendo-se por toda a Região Nordeste até proximidades do rio São João, no estado do Rio de Janeiro. Apresenta agrupamentos de árvores emergentes nas elevações mais pronunciadas dos interflúvios, como o angelim-da-mata (*Hymenolobium petraeum*), angelim-pedra (*Dinizia excelsa*), tauari (*Couratari* spp.), castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) entre outras. É significativa a presença de palmeiras que competem por luz no estrato arbóreo superior: babaçu (*Orbygnia* spp.), patauá (*Oenocarpus bataua*),

açaí (*Euterpe* spp.) (IBGE, 2012), ocorrendo preferencialmente nos locais mais úmidos (Figura III-10).

Figura III-10. Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, nos arredores da Torre K34.



Fonte: Dados de Campo (2013).

Floresta Estacional Semidecidual Submontana

Esta formação ocorre frequentemente na borda sul amazônica, no contato da Floresta Ombrófila com a Savana (Cerrado), revestindo, inclusive, terrenos terciários. Distribui-se nos estados de Mato Grosso e de Rondônia. Na forma disjunta, pode ocorrer, ainda, entremeada a formações savânicas especialmente na Região Centro-Oeste (IBGE, 2012).

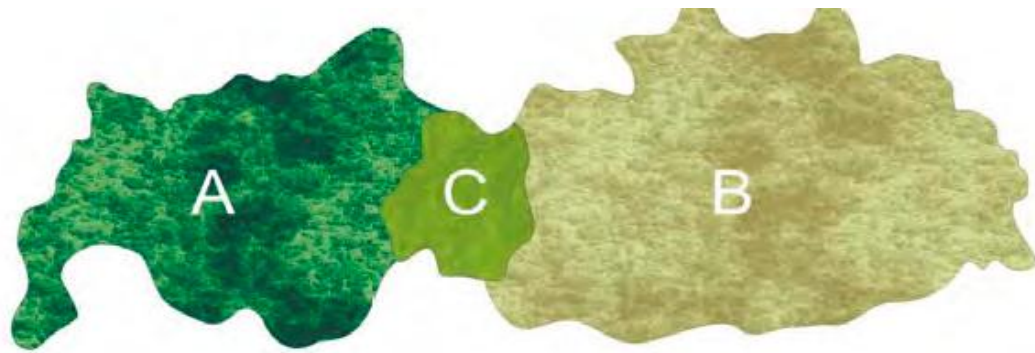
A altura média do dossel da floresta é de aproximadamente 30m (ARRUDA et al., 2006). A vegetação consiste de algumas árvores características da floresta de transição em Mato Grosso como *Qualea* sp., *Vochysia* sp. *Ocotea* sp. e *Mezinaurus itauba* (VOURLITIS et al., 2001).

De acordo com IBGE (2012), entre duas ou mais regiões fitoecológicas ou tipos de vegetação, existem, sempre, ou pelo menos na maioria das vezes, comunidades indiferenciadas, onde as floras se interpenetram, constituindo as transições florísticas ou contatos edáficos.

Nesse sentido, é importante verificar a que se referem os ecótonos (mistura florística entre tipos de vegetação). Este contato entre tipos de vegetação com estruturas fisionômicas semelhantes é impossível de ser detectado no mapeamento por simples fotointerpretação, como por exemplo, a Floresta Ombrófila/Floresta Estacional. Isto ocorre porque os elementos que se misturam são indivíduos isolados e dispersos, formando

conjuntos geralmente muito homogêneos ou uniformes. Torna-se necessário, então, o levantamento florístico de cada região fitoecológica para se poder delimitar as áreas do ecótono (Figura III-11).

Figura III-11. Esquema de uma área de tensão ecológica - contato Floresta Ombrófila/Floresta Estacional.



A - Floresta Ombrófila Densa B - Floresta Estacional Decidual C - Ecotono (mistura)

Fonte: IBGE, (2012).

Ambientes Antropizados

A Amazônia contém uma grande quantidade de carbono estocada em ecossistemas de alta diversidade. No entanto, essa região sofre grandes mudanças de uso da terra, afetando a dinâmica de precipitação, clima e o estoque de carbono (ASNER et al., 2004).

As mudanças de uso da terra na Amazônia ocorrem principalmente pela substituição da floresta nativa por grandes áreas de monoculturas, como por exemplo, a soja e imensas áreas de pastagens para criação de gado, afetando toda a biodiversidade daquela região, afetando a fertilidade do solo decorrente de longos anos em sistema de monocultura.

A conversão de florestas em outros usos da terra é fruto da continuidade tradicional forma de expansão da fronteira agrícola brasileira, que, em geral, costuma ocorrer por meio da ocupação de áreas verdes (privadas ou públicas), com a extração de sua madeira de lei, com a instalação da pecuária e, por fim, com o desenvolvimento de uma agropecuária mais moderna (REYDON, 2011).

Estudos de pesquisadores do LBA (2014) demonstraram que as mudanças no uso e cobertura da terra, como a conversão de florestas em pastagens ou outros tipos de uso,

alteram substancialmente as características físicas e químicas de rios, influenciando sua estrutura e funcionamento. A retirada da floresta permite uma maior entrada de luz, aumentando a temperatura da água, que influencia uma série de reações químicas, como por exemplo, a solubilidade do oxigênio, também acarreta uma maior entrada de partículas de solo e vegetação através de processos erosivos que se intensificam nas pastagens.

Tais alterações estão ligadas diretamente ao desmatamento de sistemas florestais para transformação em sistemas agrícolas e/ou pastagem, o que implica em transferência de carbono (na forma de dióxido de carbono) da biosfera para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global, o qual por sua vez acaba atuando sobre a região amazônica (NOBRE et al., 2007).

Pastagem

As pastagens são comunidades de plantas forrageiras que apresentam características peculiares e intrínsecas à sua espécie, gênero, cultivar, etc. Estas características correspondem a atributos morfológicos, anatômicos, fisiológicos e de comportamento (ecologia) que permitem a essas plantas adaptarem-se a um dado ambiente e desenvolverem, em maior ou menor grau, tolerância ao pastejo feito pelos animais (PAULINO; PAULINO, 2003).

As pastagens necessitam de grande quantidade de área para o desenvolvimento da economia para a expansão da pecuária, o problema é que muitas vezes, essas áreas são florestas primárias convertidas em imensas áreas de pastagens, e estão inseridas em um ecossistema frágil, que são a Floresta Amazônica.

Nas últimas décadas, grande área da Floresta Amazônica vem sendo intensamente modificada principalmente pela agropecuária. O uso de terra para pecuária, geralmente, inicia com corte raso da floresta primária, depois queima, introdução de culturas e degradação do solo (ZANCHI et al., 2009).

O papel da pecuária no processo de desmatamento e na consequente emissão de carbono também torna urgente a elaboração de políticas específicas para a atividade na Amazônia no sentido de reduzir, de alguma forma, os impactos de sua forte expansão sobre a floresta (RIVEIRO et al., 2009).

A pecuária está presente tanto na fronteira mais antiga, quanto nas zonas de expansão da ocupação da floresta, é uma atividade que, pela sua importância na

participação da ocupação, necessita de análises mais precisas bem como de políticas públicas específicas tanto para a redução do seu impacto na fronteira do desmatamento, quanto para o seu desenvolvimento (RIVEIRO et al., 2009).

Para Ewers et al. (2008) tanto a expansão agrícola, quanto a pecuária ocorrem dentro de um contexto econômico e possuem relação direta com os indicadores econômicos, como Produto Interno Bruto (PIB) e o aumento de áreas convertidas.

A pecuária é a principal economia do estado de Rondônia. Em 2008, foi o oitavo maior produtor de carne bovina do País, exportando, anualmente cerca de 70% de sua produção em um total de 480 t de carne bovina, o que resulta em um crescimento econômico e, em consequência, na rápida expansão de pastagens em detrimento das florestas tropicais (WEBLER et al., 2013).

Exploração Seletiva de Madeira

O corte seletivo é um importante uso da terra na Amazônia. A indústria madeireira é um propulsor econômico que gera lucros, empregos, e tem o potencial de ser uma fonte renovável para a região. Há consenso geral sobre sua disseminação e importância para a economia; entretanto, essa indústria tem sofrido com a fiscalização, em geral fraca e inconsistente, do governo, baixo capital de investimento e falta de conhecimento de ecologia e de manejo florestal. Essa combinação de condições tem impedido o desenvolvimento de uma indústria madeireira sustentável e produzido danos ecológicos consideráveis (ASNER et al., 2009).

Uma colheita florestal planejada e executada com rigorosos critérios técnicos não só causa baixo impacto ambiental nos meios físico, biótico e antrópico, mas também proporciona significativa redução nos custos totais da colheita de madeira. Entretanto, a colheita de madeira baseada nas recomendações de um plano de manejo sustentável, por si só, não garante a sustentabilidade da floresta explorada. É importante conhecer a composição florística e as estruturas fitossociológicas e paramétricas da floresta para fundamentar ambientalmente o manejo. Contudo, é necessário ainda um planejamento adequado para prever a intensidade com que os danos da colheita de madeira irão ocorrer nas estruturas e na arquitetura da floresta, a fim de garantir a sustentabilidade ambiental do manejo (PINTO et al., 2002).

A questão é saber como esse tipo de uso da terra na Amazônia interfere na estrutura florestal e nos estoques de carbono (Figura III-12).

De acordo com LBA (2014), na primeira fase do Programa, obteve-se um avanço significativo no entendimento da intensidade e extensão da exploração madeireira na Amazônia e nos possíveis danos ambientais causados por essa atividade (CHAMBERS et al., 2000). Estudos inovadores indicaram que a exploração madeireira era mais significativa em termos de área e com impactos sobre áreas remanescentes.

Entretanto, Nepstad et al. (1999) encontraram que a área sob exploração é semelhante à área desmatada anualmente, o que é crítico, uma vez que florestas exploradas apresentam menor diversidade em função de mudanças em sua estrutura.

Aproximadamente 16% da área explorada convertem-se em área desmatada no ano seguinte e cerca de 32% são desmatadas em quatro anos. Isto significa que a exploração madeireira não precede imediatamente o desmatamento, mas é uma forma de distúrbio e aumenta a área sob impacto de atividades humanas (ASNER et al., 2005).

Figura III-12. Área de manejo florestal em uma Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, dentro da FLONA Tapajós.



Fonte: <http://ppbio.inpa.gov.br/nregionais/nrsantarem>

Métodos e Tipo de Pesquisa

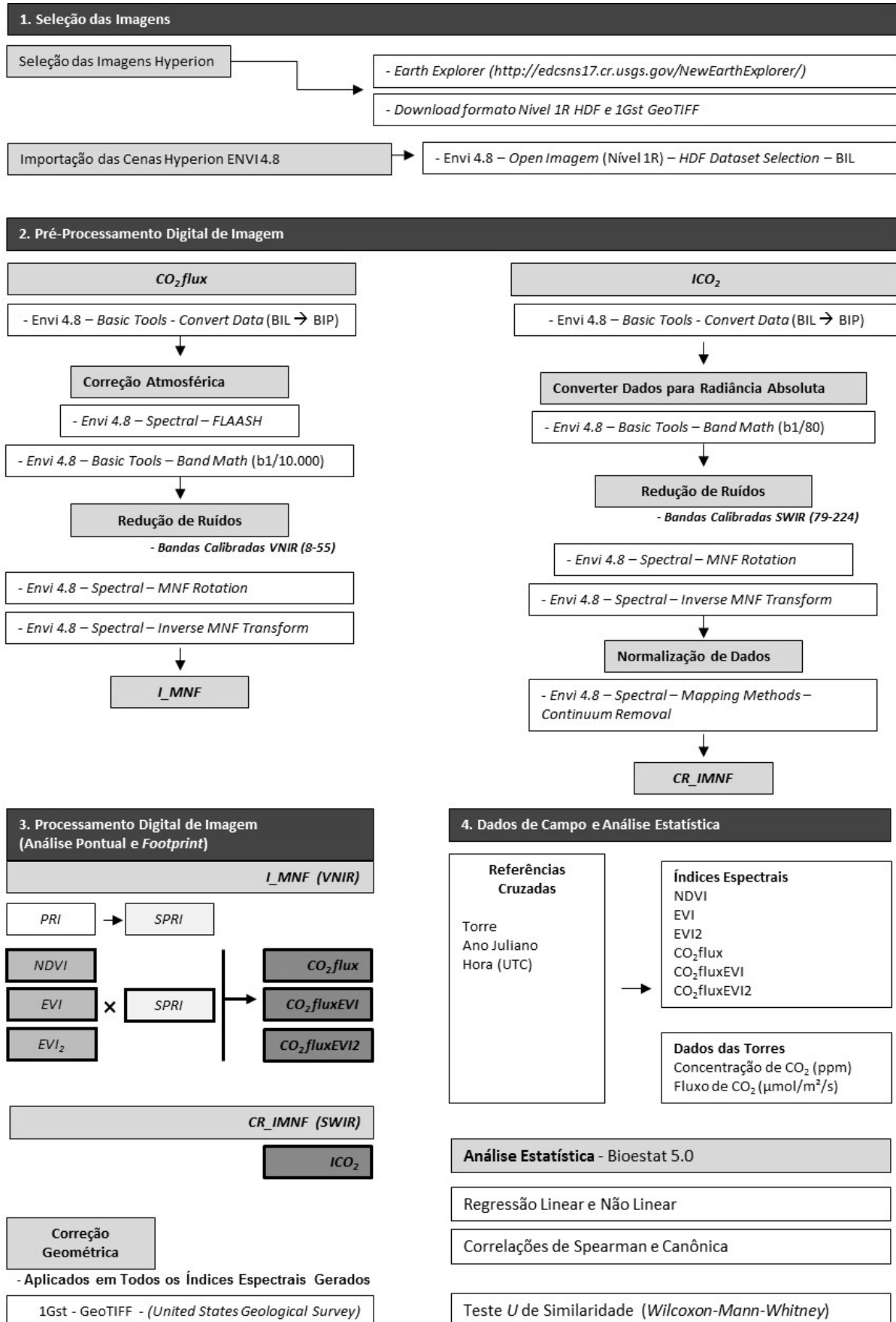
Esta pesquisa utiliza a aplicação de métodos quantitativos. Para Richardson (1989), a pesquisa quantitativa se dá pelo uso da quantificação, tanto na coleta, quanto no tratamento das informações, utilizando-se técnicas estatísticas e objetivando resultados com uma maior margem de segurança. Entretanto, é necessário que o pesquisador tenha sempre em mente que os resultados obtidos por via quantitativa, devem ter uma explicação lógica e coerente no contexto das geociências (LANDIM, 2011, p.12).

Entre as técnicas de sensoriamento remoto utilizadas para imagens hiperespectrais e dados de campo, destacam-se a correção atmosférica, redução de ruídos, correção geométrica, modelagem do fluxo de CO₂ por índices espectrais e análise estatísticas de regressão linear, não linear e os testes de hipóteses.

Para Landim (2011), a modelagem, se correta, descreve o fenômeno nos locais amostrados e pode-se tornar válida para interpolações em locais ou intervalos de tempo adjacentes, representando um passo além com relação às informações dos dados numéricos.

A figura III-13 apresenta um fluxograma do método e técnicas de pesquisa utilizadas no processamento e análise estatística das imagens do sensor Hyperion, com os dados de CO₂ da torres micrometeorológicas do Programa LBA para validação do sequestro florestal de carbono a partir de dados espectrais.

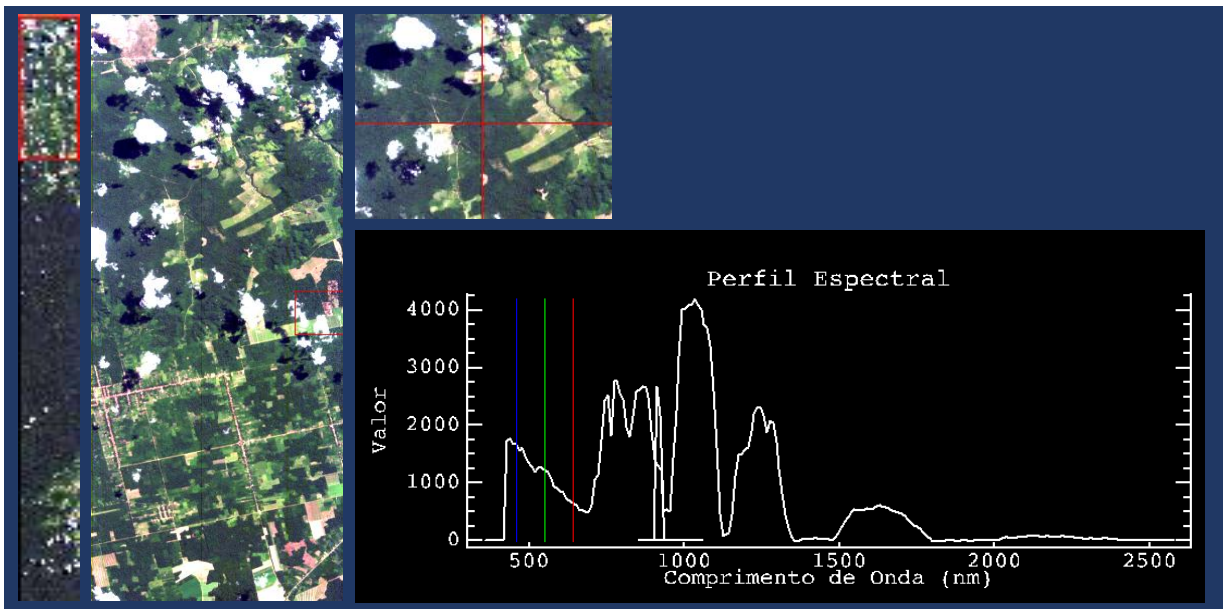
Figura III-13. Fluxograma do método e técnicas de pesquisa utilizados no estudo.



Universo Amostral e Aquisição das Imagens do Sensor Hyperion

Neste estudo, foram utilizadas 21 imagens hiperespectrais, obtidas pelo sensor Hyperion, instalado no satélite EO-1 (*Earth Observing-1*) da NASA. Cada imagem possui 242 bandas, nos comprimentos de onda de 0,4 a 2,5 μm , e sua resolução espacial é de 30 metros, com largura de 7,5 km (Figura III-14).

Figura III-14. Detalhes do comportamento espectral da vegetação em uma cena do sensor Hyperion.



As 21 imagens Hyperion² utilizadas no estudo correspondem às localizações das 05 torres micrometeorológicas (k84, k83, k67, FNS e SIN) do Programa LBA, que cobre a Região Amazônica.

Inicialmente foram selecionadas 56 imagens entre os anos de 2001 a 2005, com porcentagem de cobertura de nuvens entre 0-69%. Porém apenas 21 imagens foram utilizadas no estudo, devido, principalmente, à ausência de dados de campo para determinadas cenas, à formação de nuvens em cima dos pixels que seriam analisados, comprometendo a medição do CO_2 flux e ICO_2 na imagem e dados perdidos da torre JAR

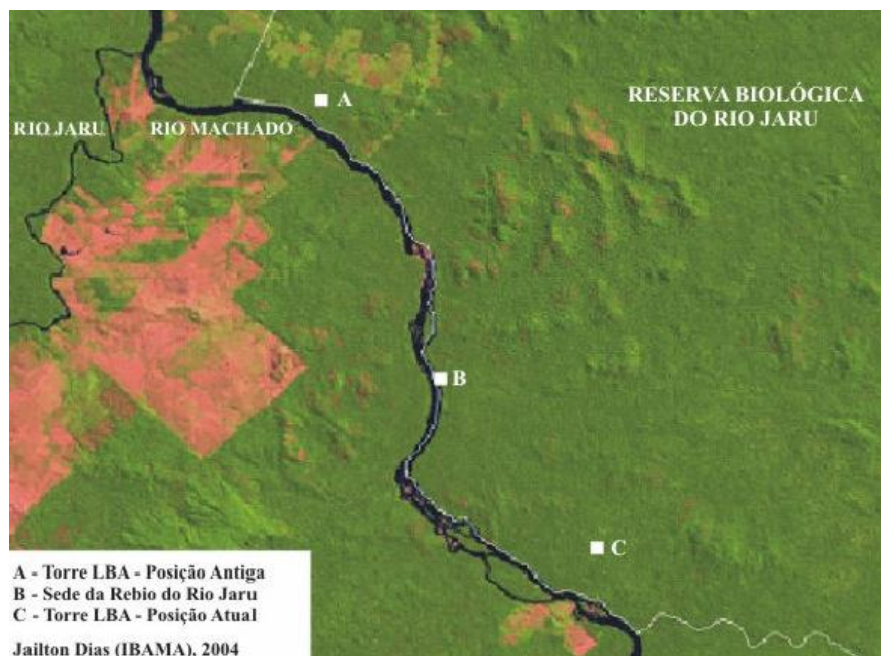
² As imagens Hyperion são fornecidas gratuitamente pelo *United States Geological Survey* (USGS), no nível 1R (com correções radiométricas e preparação dos dados para entrega aos usuários) em valores de radiância de 16 bits, no formato HDF (*Hierarchical Data Format*), no site *Earth Explorer* da USGS.

(Reserva Biológica do Jaru), por motivo de seu novo reposicionamento geográfico sem o que não haveria imagens de satélite do sensor Hyperion para correlacionar.

A torre JAR que estava sendo monitorada desde março de 1999, em novembro de 2002, devido à ocorrência de queimadas muito próximas, ocasionadas por invasores, foi desativada. O sítio experimental e o sistema de medidas de fluxos turbulentos só foram reativados em janeiro de 2004, dentro da mesma reserva (10,08° S; 61,93° W), com aproximadamente 13 km ao sul da posição antiga. As localizações: antiga (A) e atual da torre (C) podem ser observadas na Figura III-15.

Na posição antiga, a torre se encontrava a 600 metros da margem do rio Machado, e havia uma área desflorestada ao seu redor (AGUIAR, 2005).

Figura III-15. Localizações das posições antiga e atual da Torre JAR (Reserva Biológica do Jaru).



Fonte: Aguiar, 2005.

Na visita de campo, realizada em outubro de 2013, foi verificado que a torre se encontra a 1.240m da margem do rio Jaru, com acesso por uma trilha de 1.500m em uma área mais preservada da floresta. A logística para chegar ao local foi facilitada pelos professores e alunos da Universidade Federal de Rondônia – Campus de Ji-Paraná que fizeram o trajeto pela estrada e por técnicos do IBAMA com acesso pelo rio Machado (Figura III-16).

Figura III-16. Torre JAR do Programa LBA. a) estrada de acesso à torre; b) acesso pelo rio Jaru; c) trilha de 1500m; d) base da torre e equipamentos; e) torre JAR com 62 metros de altura e f) vista do dossel da floresta densa.



Fonte: Dados de Campo (2013).

Dessa forma, não foi possível correlacionar as imagens do sensor Hyperion com a nova posição geográfica da torre JAR, pois os arquivos do USGS apenas possuem imagens que recobrem a área da antiga torre e não da atual. Assim, apenas 21 imagens do sensor Hyperion foram utilizadas no estudo (Tabela III-2).

Tabela III-2. Universo amostral e características das imagens Hyperion.

Nome das Torres LBA	Imagem Hyperion	Dia e Ano Juliano	Data	Cobertura de Nuvens	Inclinação do satélite	Órbita / Ponto	Imageamento	
							Início	Fim
K34	EO1H2310622002219110KY	2002 219	07 08 2002	20% a 29%	98.18	231/62	13:55:45	13:55:59
	EO1H2310622002226110PY	2002 226	14 08 2002	10% a 19%	98.18	231/62	14:01:27	14:02:36
	EO1H2310622002315110KV	2002 315	11 11 2002	20% a 29%	98.23	231/62	13:55:25	13:55:39
	EO1H2310622003174110KT	2003 174	23 06 2003	0% a 9%	98.18	231/62	13:56:11	13:56:26
	EO1H2310622005218110PE	2005 218	06 08 2005	0% a 9%	98.16	231/62	14:03:06	14:03:21
K83	EO1H2270622001211110PO	2001 211	30 07 2001	50% a 59%	98.17	227/62	13:37:41	13:42:01
	EO1H2270622001227111PO	2001 227	15 08 2001	70% a 79%	98.17	227/62	13:37:18	13:41:47
	EO1H2270622001307111PF	2001 307	03 11 2001	40% a 49%	98.22	227/62	13:36:47	13:49:50
	EO1H2270622002189110KZ	2002 189	08 07 2002	10% a 19%	98.18	227/62	13:43:13	13:44:22
	EO1H2270622002221110KV	2002 221	09 08 2002	30% a 39%	98.18	228/62	13:42:57	13:44:06
	EO1H2270622003137110PN	2003 137	17 05 2003	20% a 29%	98.19	227/62	13:37:50	13:38:04
	EO1H2270622003185110PW	2003 185	04 07 2003	20% a 29%	98.18	227/62	13:37:14	13:38:23
EO1H2270622003233110PN	2003 233	21 08 2003	0% a 9%	98.18	227/62	13:37:33	13:37:47	
K67	EO1H2270622002189110KZ	2002 189	08 07 2002	10% a 19%	98.18	227/62	13:43:13	13:44:22
	EO1H2270622002269110KO	2002 269	26 09 2002	10% a 19%	98.18	228/62	13:42:35	13:43:44
	EO1H2270622002285110KR	2002 285	12 10 2002	30% a 39%	98.23	228/62	13:42:17	13:43:26
	EO1H2270622003233110PN	2003 233	21 08 2003	0% a 9%	98.18	227/62	13:37:33	13:37:47
	EO1H2270622005206110PD	2005 206	25 07 2005	0% a 9%	98.18	227/62	13:36:22	13:40:40
FNS	EO1H2310672003220110KR	2003 220	08 08 2003	20% a 29%	98.18	231/67	14:10:03	14:11:13
	EO1H2310672003236110KR	2003 236	24 08 2003	0% a 9%	98.18	232/67	14:10:04	14:11:14
SIN	EO1H2260682002191110PY	2002 191	10 07 2002	0% a 9%	98.18	226/68	13:33:17	13:34:25

Aquisição dos Dados Micrometeorológicos

Os dados de campo foram coletados durante todo o ano de 2000 a 2012 e solicitados junto aos escritórios locais do Programa LBA. As visitas nas torres micrometeorológicas foram realizadas entre os meses de agosto a outubro de 2013, com o auxílio dos pesquisadores, professores e estudantes e técnicos de Instituições que são vinculados às pesquisas realizadas em cada torre. Foram necessários também máquina fotográfica e GPS.

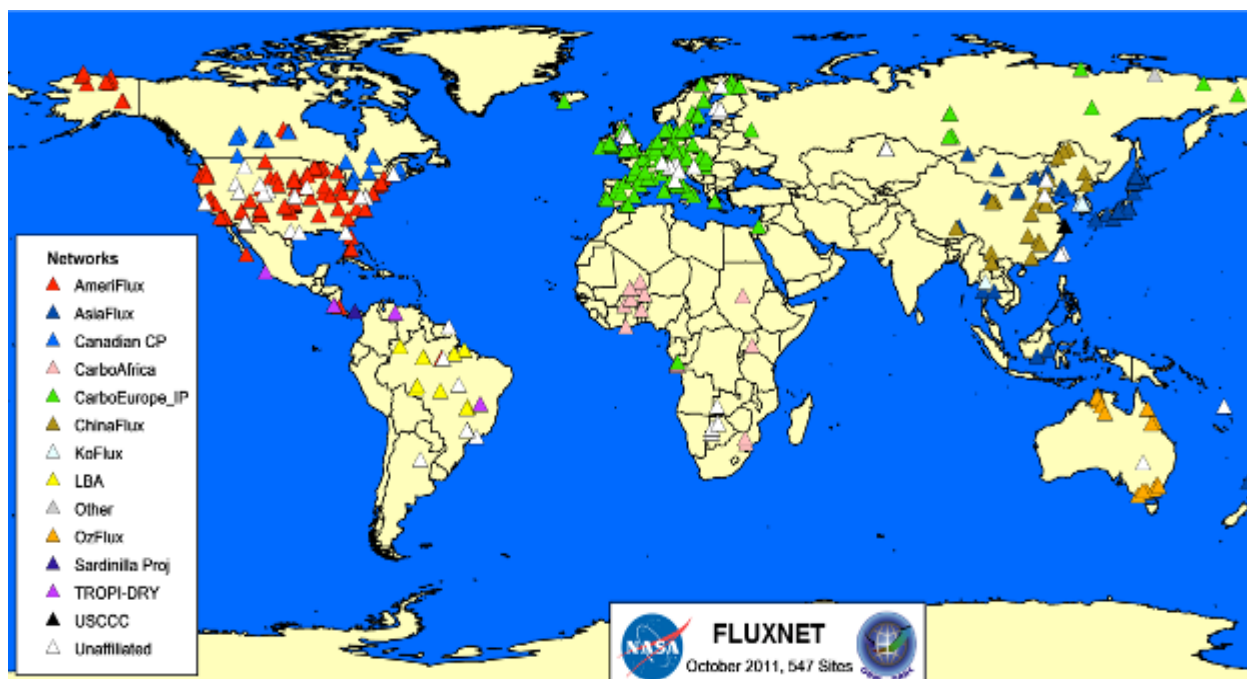
Nas torres micrometeorológicas, os fluxos medidos são os de *momentum*, de calor sensível, de calor latente (evapotranspiração) e de gás carbônico. São monitoradas também as variáveis de precipitação, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, magnitude e direção do vento e radiação solar e terrestre) e as variáveis do solo (temperatura e umidade do solo e o fluxo de calor no solo). Na maioria dos sítios experimentais de floresta, são monitorados os perfis verticais de temperatura, umidade e concentração de gás carbônico no interior e acima da vegetação (LBA, 2011).

Os dados medidos e aferidos podem ser acessados quando disponíveis na Rede FLUXNET (fluxnet.ornl.gov). A Rede FLUXNET³ é uma rede que coordena e analisa de forma regional e global as observações a partir das torres micrometeorológicas. O banco de dados da FLUXNET contém informações sobre o localização e características do local, bem como a disponibilidade de dados. Os dados de CO₂ são mantidos na frequência de 30 minutos para permitir o processamento de dados padronizado, preenchimento de lacunas e formatos por vários pesquisadores.

Os sítios experimentais das torres de fluxo usam o *sistema Eddy Covariance* para medir as trocas de CO₂, vapor de água e energia entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Atualmente mais de 500 sítios experimentais estão operados a longo prazo e de forma contínua em pelo menos cinco continentes e sua distribuição latitudinal varia entre 70^o norte a 30^o ao sul (Figura III-17).

³ FLUXNET , que é um componente da ORNL DAAC da NASA (*Distributed Active Archive Center*), tem a função de fornecer infraestrutura para uma base de dados central dos sítios experimentais (clima, meteorologia, vegetação, solo e outros dados); mantém as informações sobre a disponibilidade de dados de fluxo, juntamente com links dos dados de fluxo em torres individuais ou em redes; compila, arquivos, e distribui informações sobre carbono, água e medições de fluxo de energia; fornece informações para a avaliação de produtos de sensoriamento remoto , tais como, produtividade primária , evaporação, albedo e absorção de energia.

Figura III-17. Distribuição continental das torres de fluxos das redes regionais, formando a rede global de fluxos.



Fonte: Disponível em: <http://fluxnet.ornl.gov>. Acesso em 14/01/2014.

Os dados também podem ser solicitados junto aos escritórios locais do LBA ou acessados com autorização pelo site (lba.cptec.inpe.br).

Instrumentação

Foram solicitados dados de seis torres micrometeorológicas na região amazônica (K34, K83, K67, FNS, JAR e SIN) equivalentes a uma série temporal de 2001 a 2005, dados que coincidem com as imagens do sensor Hyperion disponíveis.

As variáveis (Tabela III-3) analisadas foram:

- Direção e velocidade do vento;
- Fluxo de CO₂;
- Média local de CO₂;
- Perfis de concentração de CO₂.

Tabela III-3. Variáveis da estação automática AWS (*Automatic Weather Station*) e do Sistema Edd (*Eddy Correlation System*), nas torres em estudo.

Cód.	Var. Medidas	Torres	Sensor	Altura do Sensor (m)	Unidades de Medidas
SISTEMA DE MEDIDAS AWS - (<i>Automatic Weather Station</i>)					
U	Velocidade do vento	K34	Anemômetro Vector A100R	53,10	m/s
		K83	Met One 014	64,00; 50,00; 40,00	m/s
		K67	CSAT-3 (Campbell Scientific, Inc.)	58,00; 47,00	m/s
		FNS	05305 (RM Young)	9,90	m/s
		SIN	Anemômetro-termômetro sônico tridimensional (SWS-211/3K)	12,00	m/s
Udir	Direção do vento	K34			Graus
		K83	Campbell CSAT3	64,00	Graus
		K67	Campbell Scientific, Inc.)	64,00	Graus
		FNS	05305 (RM Young)	9,90	Graus
		SIN	Anemômetro-termômetro sônico tridimensional (SWS-211/3K)	12,00	Graus
SISTEMA DE MEDIDAS Edd - (<i>Eddy Correlation System</i>) e Perfis de CO₂					
Flx_Lo-CO ₂	Fluxo de CO ₂	K34	LI-6262/LI-7000/LI-7500, LI-COR	53,10	μmol/m ² /s
		K83	Li-Cor LI7000/LI7500	64,00	μmol/m ² /s
		K67	Anemômetro ultrassônico (CSAT-3, Campbell Scientific Inc)	58,00	μmol/m ² /s
		FNS	---	---	---
		SIN	---	---	---
Mea_Lo-CO ₂	Média Local de CO ₂	K34	LI-6262/LI-7000/LI-7500, LI-COR	53,1	μmol/mol
		K83	---	---	---
		K67	---	---	---
		FNS	LI-7500 (LI-COR Inc.)	3,10	μmol/mol
		SIN	---	---	---
Perfil de CO ₂	Concentração de CO ₂	K34	LI-820/li-840, LI-COR	53,10; 35,30; 28,00; 15,60; 05,20; 00,50	ppm
		K83	LI-COR LI7000	64,00; 50,00; 40,00; 35,00; 20,00; 10,70; 06,00; 03,00; 01,40; 00,70; 00,35; 00,10	ppm
		K67	LI-6262, Licor	62,24; 50,05; 39,41; 28,71; 28,71; 19,57; 10,42; 03,05; 00,91	ppm
		FNS	LI-7500 (LI-COR Inc.)	03,10	ppm
		SIN	Modelo LI- 820, LI - COR	28,00; 20,00; 12,00; 04,00; 01,00	ppm

Vários instrumentos foram desenvolvidos para medir a velocidade do vento, entretanto os dados das torres micrometeorológicas utilizaram principalmente os anemômetros de hélice e os anemômetros sônicos (Figura III-18).

Figura III-18. Anemômetro Vector para medição de velocidade de vento e placa solar instalados nas torres.



Fonte: Dados de Campo (2013).

A concentração média de CO_2 nas torres micrometeorológicas pesquisadas é medida com grande acurácia por um analisador de gás infravermelho, comumente conhecido como IRGA (*infrared gas analyzers*). E um dos modelos mais utilizado é o analisador de gás de caminho aberto modelo (LI-7500, LI-COR, Inc.) é um instrumento utilizado para realizar medidas simultâneas das concentrações de CO_2 e vapor d'água na atmosfera (Figura III-19).

Figura III-19. Analisador de gás infravermelho, instalados nas torres K34 e FNS.



Fonte: Dados de Campo (2013).

As medidas de fluxos de CO_2 são determinadas pelo método de covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*). É um sistema que mede as três componentes da velocidade do vento (velocidade horizontal do vento a leste, velocidade horizontal do vento a norte e a velocidade vertical do vento) e a temperatura do ar, e o intervalo de tempo utilizado no cálculo das médias e flutuações dos sinais turbulentos é de 30 minutos (AGUIAR et al., 2006).

A técnica da covariância dos fluxos turbulentos é utilizada para medir as interações de CO₂ entre a atmosfera, pastagens e florestas. Isto permite determinar o fluxo vertical de CO₂, usando o cálculo da covariância entre as flutuações da velocidade vertical do vento e das concentrações de CO₂ em todas as frequências. Esse método está baseado nos redemoinhos que acontecem na atmosfera, onde turbilhões mais aquecidos e mais úmidos gerados na superfície são deslocados verticalmente, sendo substituídos por turbilhões menos aquecidos e mais ou menos úmidos, os quais são responsáveis pelo transporte vertical das propriedades da atmosfera entre os quais está o CO₂ (SILVA JUNIOR, 2003).

Representatividade espacial do sensor

De acordo com TEICHRIEB (2012), investigações micrometeorológicas sobre superfícies vegetadas como florestas e culturas agrícolas e outras formas de vegetação requerem atenção quanto à altura do sensor, uma vez que esse fator terá influência na representatividade espacial (*footprint*) do mesmo.

O *footprint* trata-se do campo de visão do sensor ou área de influência das medições que são realizadas pelas torres micrometeorológicas.

Algumas das torres micrometeorológicas calculam o *footprint* automaticamente juntamente com as demais variáveis. Para as torres FNS, JAR e K34, a variável é calculada no modelo teórico de Schuepp et al. (1990), utilizando-se a equação para condições quase neutras a seguir:

$$CNF(x_L) = \int_0^{x_L} \frac{U(z-d)}{u_* k x^2} \exp\left[-\frac{U(z-d)}{u_* k x}\right] dx = \exp\left[-\frac{U(z-d)}{u_* k x_L}\right] \quad \text{(III-1)}$$

A *CNF* é a contribuição cumulativa normalizada para a medição do fluxo (%); x_L é a distância da estação (m); U é a velocidade média do vento integrada ($m\ s^{-1}$); z é a altura da medição (m); u_* é a velocidade de fricção; k é a constante de Von Karman (0,4) e d é o deslocamento do plano zero (m).

Não foi possível calcular o *footprint* da torre SIN, que possui apenas uma imagem Hyperion, pela falta de variáveis medidas no dia.

Para as torres k67 e k83 o *footprint* foram calculadas utilizando a equação de Kljun et al. (2004), utilizando o site <http://footprint.kljun.net/varinput.php>, com a entrada de dados das torres micrometeorológicas:

Dados de entrada:

- σ_w [ms⁻¹): desvio padrão das flutuações de velocidade vertical
- u^* [ms⁻¹): velocidade de fricção da superfície na torre
- z_m [m]: altura de medição do sensor na torre
- h [m]: altura da camada limite planetária de 1.000 m
- z_0 [m]: comprimento de rugosidade para floresta de 2,650 (CORREIA et al., 2005)
- R [0-90%]: percentagem do *footprint* de 80%

Calcular o *footprint* de uma dada localização tem importância relativa das fontes que influenciam as medições de fluxo a uma dada altura do receptor. Estimativas de *footprint* podem variar fortemente em tamanho, dependendo da altura do receptor, estabilidade atmosférica e a rugosidade da superfície.

Para facilitar as estimativas de *footprint*, Kljun et al. (2004) introduziram um processo de escalonamento para as funções de *footprint* do fluxo que estratifica as medições por alturas dos receptores, estabilidades da camada limite, e para um dado comprimento de rugosidade perto da superfície para o meio da camada limite. Demonstrou-se que, quando se aplica este processo de escalonamento, as estimativas de footprint do fluxo não diferem estatisticamente, e apresenta-se um conjunto de curvas semelhantes. Aplicando o procedimento de escala, essa estimativa de *footprint* pode ser estendido para qualquer condição de estabilidade.

As principais variáveis que definem esta função principal é a velocidade de atrito superficial, o desvio padrão da velocidade vertical no receptor, o receptor de altura, a altura da camada limite planetária, a distância horizontal entre o receptor localização e a função de footprint. Usando esse conjunto de informações foi elaborada a equação sintetizada pelo programa (Equação III-2).

Distância Peak contribuinte (m):

$$X_{peak} = X_{peak}^* h_m \left(\frac{\sigma_w}{u_*} \right)^{-0.8}, X^* = c - d \quad (\text{III-2})$$

NN% de contribuição (m):

$$X_{NN\%} = X_{NN\%}^* h_m \left(\frac{\sigma_w}{u_*} \right)^{-0.8}, X_{NN\%} = L'_{NN\%} \cdot c - d$$

A segunda equação é utilizada para proporcionar a distância de deslocamento (NN = 1) e os 10% a 90% distâncias. Nestas equações, os parâmetros c e d são calculados utilizando as equações 13 a 16 em Kljun et al. (2004) (onde o comprimento de rugosidade entra como um parâmetro). A distância $L' 1$ é tabulado para cada percentual entre 0 e 95%.

Desde a década de 90, modelos de *footprint* vem sendo desenvolvido, devido principalmente ao advento dos instrumentos de alta precisão utilizando a técnica *Eddy Covariance* para medir os fluxos locais diretos de gases traço. Entretanto, representar a área de influência desses gases é uma função complexa que envolve diversas variáveis meteorológicas. Para áreas homogêneas não é um problema, desde que o sensor esteja dentro da camada de fluxo constante (VESALA et al., 2008).

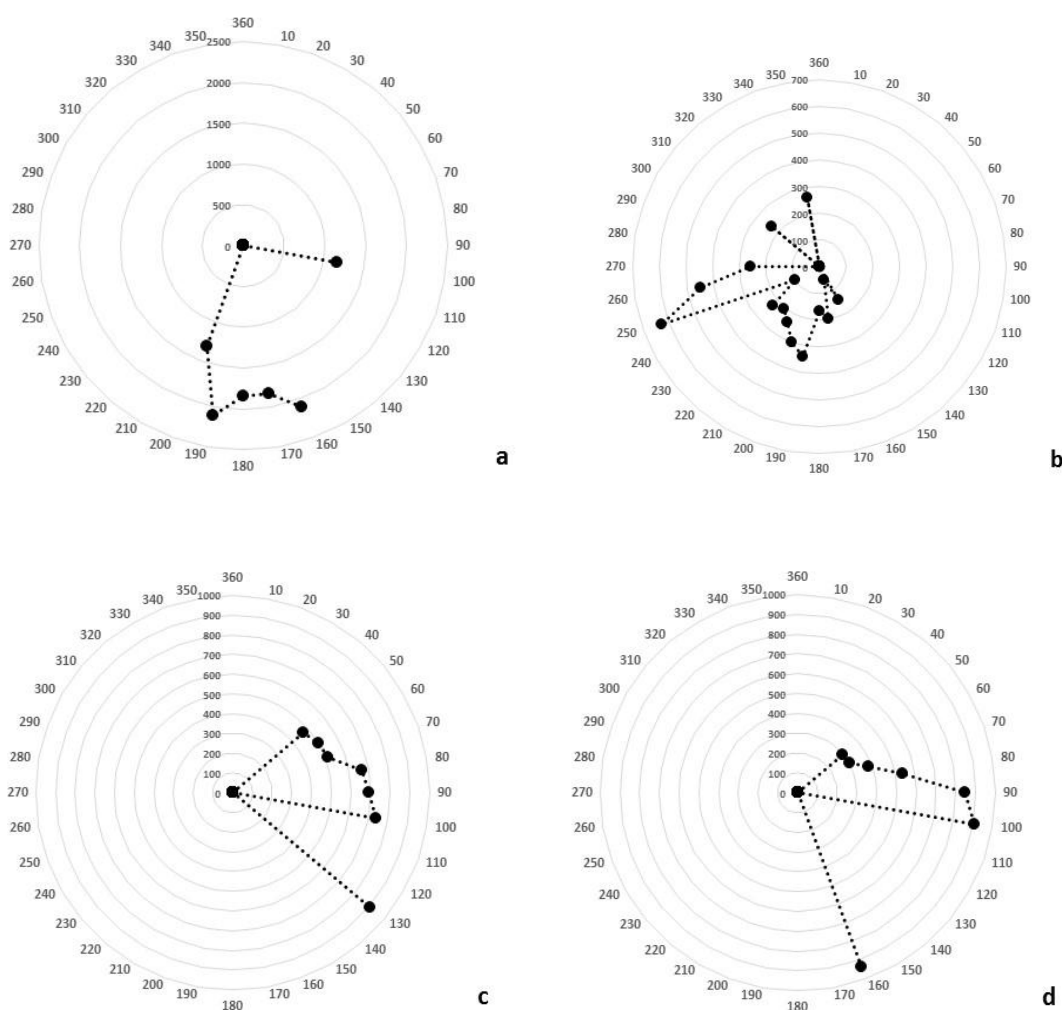
O *footprint* determina as áreas de maior influência sobre as concentrações ou fluxos de constituintes atmosféricos em um determinado local. A determinação do *footprint* é necessária para a interpretação dos resultados, especialmente quando envolvem diferentes paisagens (ZHAO et al, 2014).

O *footprint*, portanto, descreve a relação entre a distribuição espacial e o sinal fonte/sumidouro do fluxo e concentração dos gases traço, é definido pelo campo de visão do sensor que reflete sua influência sobre a superfície (SHUEPP et al., 1990).

O *footprint* foi elaborado a partir do comprimento de rugosidade da superfície, estrutura do dossel, associado as condições meteorológicas (velocidade vertical do vento, intensidade de turbulência e estabilidade atmosférica), sua direção foi determinada pela direção dos ventos e altura do sensor. O *footprint* das torres K34 e FNS foram calculados automaticamente pelos instrumentos de medição instalados nas torres, o *footprint* para K83 e K67 foram calculados pelo site <http://footprint.kljun.net/varinput.php> e a torre SIN, que possui apenas uma imagem Hyperion não foi possível calcular pela falta de variáveis medidas no dia.

Na figura III-20, é possível verificar a distribuição de frequência da direção do vento dos dados de medição das torres correspondente as imagens Hyperion para cada sítio experimental. A direção predominante dos ventos para a torre K34 é a sudeste (SE), para a torre FNS é sudoeste (SW), para as torres K83 e K67, a direção é a nordeste (NE) com variação também para sudoeste (SW). A média de distribuição de frequência de direção dos ventos foi delimitada para os períodos diurnos nos dias julianos das 20 imagens Hyperion.

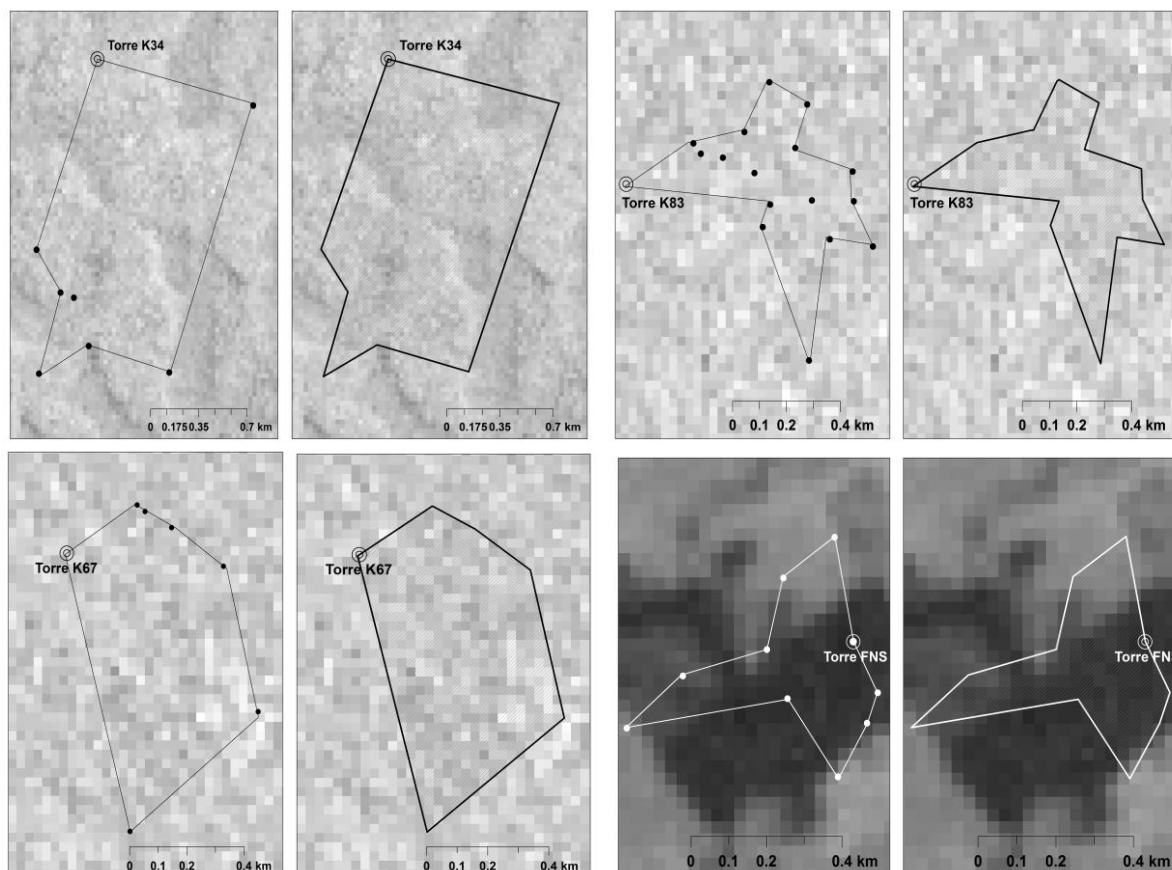
Figura III-20. Frequência da distribuição do vento e percurso do fluxo (m) para: a) torre K34, b) torre FNS, c) torre K83 e d) torre K67.



Uma vez examinada a frequência de direção dos ventos e o percurso do fluxo (m), os pontos são plotados em um *software* de Sistema de Informação Geográfica, que utiliza as coordenadas geográficas das torres como referência e uma imagem Hyperion georreferenciada. A partir da plotagem dos pontos são criados os polígonos, que delimitam a área de influência

ou, o *footprint* da torre. Esse procedimento foi realizado para as quatro torres micrometeorológicas (Figura III-21).

Figura III-21. Footprint das torres K34, K67 e FNS.



No software ENVI, o *footprint* de cada torre foi importado pelo *Open Vector File*. A média dos pixels foram determinados pelo ROI (*Region Of Interest*). O ROI gerou uma feição que representa o *footprint* em (ha) indicando as áreas de influência de cada torre.

Pré-Processamento de Imagens Digitais do Sensor Hyperion

Para o processamento digital das imagens de satélite, foi utilizado o Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial do Instituto de Geociências, da Universidade de Brasília - UnB, com licença de uso de software ENVI - *Environment for Visualizing Images*).

A função primordial do processamento digital de imagens é fornecer ferramentas computacionais para facilitar a identificação e a extração das informações contidas nas imagens, objetivando sua posterior análise e interpretação (SILVA, 2010).

Para Meneses e Almeida (2011), as técnicas de pré-processamento são, essencialmente, funções operacionais para remover ou corrigir os erros e as distorções

introduzidos nas imagens pelos sistemas sensores devidos a erros instrumentais (ruídos espúrios), às interferências da atmosfera (erros radiométricos) e à geometria de imageamento (distorções geométricas).

Como o sensor Hyperion opera a partir de uma plataforma orbital com conseqüente relação sinal ruído moderado e devido aos efeitos atmosférico, o processamento dos dados demanda um cuidado maior (DATT et al., 2003), assim foram realizadas primeiramente, a correção atmosférica e a minimização dos ruídos na imagem.

Conversão de ND para Radiância Absoluta

A determinação do CO₂flux e ICO₂ nas imagens do Hyperion foi realizada mediante o reescalonamento dos valores ND (Número Digital) das imagens de radiância. Para extração da informação referente ao CO₂flux, utilizaram-se as bandas calibradas no VNIR (8-57), que foram multiplicadas por 40 e para a determinação do ICO₂, utilizaram-se as bandas calibradas no SWIR (77-224) multiplicadas por 80. Esse método pode ser consultado no Guia de Usuário do Sensor Hyperion (EO-1 USER GUIDE, 2003). No software ENVI, a conversão para Radiância Absoluta foi realizada a partir do módulo *Basic Tools – Band Math*.

Correção Atmosférica

A correção dos efeitos atmosféricos foi realizada utilizando o modelo de transferência radiativa MODTRAN, que é baseado em parâmetros físicos da atmosfera que fornece maior precisão para o cálculo dos valores de radiância e reflectância das superfícies terrestres a partir dos dados obtidos pelos sensores orbitais (MENDONÇA et al., 2007; ENVI, 2011).

Para a atenuação dos efeitos atmosféricos nas imagens do Hyperion, utilizou-se o aplicativo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*)⁴. O FLAASH fornece precisa derivação com base nas propriedades atmosféricas, tais como, albedo da superfície, altitude de superfície, coluna de água, de vapor e de aerossóis e superfície e temperatura atmosférica (KRUSE, 2004).

⁴ O FLAASH foi desenvolvido pela empresa *Spectral Science, Inc.*, em colaboração com a AFRL (*U.S. Air Force Research Laboratory*) e com os pesquisadores da SITAC (*Spectral Information Technology Application Center*). O modelo de correção atmosférica empregado pelo FLAASH foi o MODTRAN (*Moderate Resolution Transmittance*).

Os dados de latitude e longitude, hora de obtenção da imagem, altitude do sensor de 705km, visibilidade inicial de 40km e informações dos sítios experimentais das torres micrometeorológicas na região amazônica foram utilizados para alimentação do FLAASH para o pré-processamento de 21 imagens hiperespectrais. Os parâmetros do modelo incluíram uma atmosfera tropical com um modelo de aerossol rural, com concentração média de CO₂ na atmosfera de 390ppm, e as altitudes do terreno foi verificada a partir de cada sítio experimental. Assim, para a torre K34 (130m), K83 (150m), K67 (90m), FNS (150m), SIN (280m) e JAR (150m). A quantidade de aerossóis e a visibilidade média da cena foram determinadas usando o método K-T no FLAASH.

Redução de Ruídos

Embora as imagens hiperespectrais forneçam um espectro contínuo, geram uma grande quantidade de dados necessários para o processamento, influenciando na demanda computacional. Além de possuir bandas estreitas contíguas, grande parte dos dados do espectro é redundante, assim como sua suscetibilidade às interferências de ruídos, o que dificulta a identificação e a análise de materiais. Para esses casos, Green e colaboradores desenvolveram o *Minimum Noise Fraction* - MNF (GREEN et al., 1988).

A transformação por Fração de Ruído Mínima ou *Minimum Noise Fraction* - MNF foi proposto em 1988 por Green e colaboradores, sendo denominado originalmente de Fração de Ruído Máxima. Entretanto, em 1994, os autores Boardman e Kruse propuseram uma nova denominação do método como Fração de Ruído Mínima, considerando a ordem inversa da saída das componentes, que conciliava tanto os procedimentos de segregação da componente ruído, quanto a redução da dimensionalidade dos dados (CARVALHO-JÚNIOR et al., 2002).

Neste estudo foi aplicado o método MNF, como rotina para o processamento das imagens do sensor Hyperion. Nesse pré-processamento, entretanto, utilizaram-se somente as bandas radiometricamente calibradas (Tabela III-4). Assim, para o cálculo de CO₂flux, foi aplicada a técnica de MNF nas bandas de 8 a 55 e para o cálculo de ICO₂, nas bandas de 79 a 224.

O produto final dos dados do sensor Hyperion com as bandas adquiridas e calibradas inclui uma pequena área de sobreposição entre os espectrômetros VNIR e SWIR (bandas 56-57 e 77-78). Assim, excluindo duas dessas bandas, têm-se, ao final, 196 bandas espectrais que são utilizadas nos processamentos digitais.

Tabela III-4. Cobertura espectral do Hyperion.

Faixa Espectral	Banda	Comprimento de Onda (μm)	Status
VNIR	1-7	0,356-0,417	Não calibrada
	8-55	0,426 – 0,895	Calibrada
	56-57	0,913 – 0,926	Calibrada (sobreposição com SWIR 77-78)
	58-70	0,936 – 1,058	Não calibrada
SWIR	71-76	0,852 – 0,902	Não calibrada
	77-78	0,912 – 0,923 -	Calibrada (sobreposição com VNIR 56-57)
	79-224	0,933 – 2,396 -	Calibrada
	225-242	2,406 – 2,578	Não calibrada

Fonte: Disponível em <http://eo1.usgs.gov/sensors/hyperioncoverage>.

Processamento de Imagens Digitais do Sensor Hyperion

Determinação do Fluxo de CO₂ por Índices Espectrais

O índice CO₂flux (RAHMAN et al., 2000) mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação (RAHMAN et al., 2001; BAPTISTA, 2003). Para sua determinação, é utilizada a integração do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) com o sPRI (*Photochemical Reflectance Index* reescalonado para valores positivos). Para Baptista (2003, 2004), isso é facilmente compreendido, pois, quanto maior for a atividade fotossintética, maior serão as feições de absorção nas faixas do azul e do vermelho.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), desenvolvido por Rouse et al. (1973), utiliza as bandas do vermelho e do infravermelho em um processo de diferença normalizada pela soma, que visa representar percentualmente a relação de uma banda com outra. Essa operação aritmética permite uma clara distinção das áreas com vegetação, devido à relação da absorção na faixa do vermelho e o pico de reflectância na faixa do infravermelho próximo, o que permite a medição da intensidade da banda de absorção ou feição espectral.

O índice NDVI (Equação III-3) consiste na razão da diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (0,66 μm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (0,8 μm).

$$NDVI = \frac{R_{0,800} - R_{0,660}}{R_{0,800} + R_{0,660}} \quad (III-3)$$

R_i é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, em μm , de valor i .

O PRI (Equação III-4) é razão da diferença existente entre a feição de absorção no azul (0,531 μm) e o pico de reflectância do verde (0,57 μm) e pode ser correlacionado com a eficiência da luz na fotossíntese (GAMON et al., 1997).

$$PRI = \frac{R_{0,531} - R_{0,57}}{R_{0,531} + R_{0,57}} \quad (III-4)$$

R_i é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, em μm , de valor i .

Entretanto, o PRI precisa de um reescalonamento de seus valores, evitando dados negativos, sendo denominado de sPRI. O reescalonamento para valores positivos é necessário para normalizar os dados de “verdor” da vegetação. O sPRI (Equação III-5) é obtido por meio do PRI, adicionando uma unidade e dividindo o resultado por dois.

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

A determinação do índice CO_2flux é realizada pela multiplicação, no módulo *Band Math*, dos planos de informação NDVI e sPRI.

Outra questão importante nesse estudo foi verificar a influência na análise do sequestro florestal de carbono por meio do CO_2flux , adotando-se outros índices de vegetação (EVI e EVI2) propostos por Huete et al. (1997) e Jiang et al. (2008), respectivamente.

De acordo com Huete et al. (1997), o índice de vegetação melhorado ou realçada EVI (Equação III-6) emprega as bandas espectrais do infravermelho próximo, região do vermelho e a reflectância na faixa do azul é utilizada para indicar o vigor vegetativo.

$$EVI = G \frac{N - R}{N + C_1R - C_2B + L} \quad (III-6)$$

N , R e B = reflectância do infravermelho próximo, vermelho e azul;

C_1 = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho = 6;

C2 = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no azul = 7,5;

L = fator de ajuste para o solo = 1

G = fator de ganho = 2,5

O EVI2 (Equação III-7) é funcionalmente equivalente ao EVI, embora seja ligeiramente mais propenso a ruído de aerossol, mas, com os avanços contínuos das técnicas de correções atmosféricas, essa evidência torna-se menos significativa ao longo do tempo (JIANG et al., 2008).

$$EVI2 = 2,5 \frac{(N-R)}{N + 2,4R + 1} \quad (III-7)$$

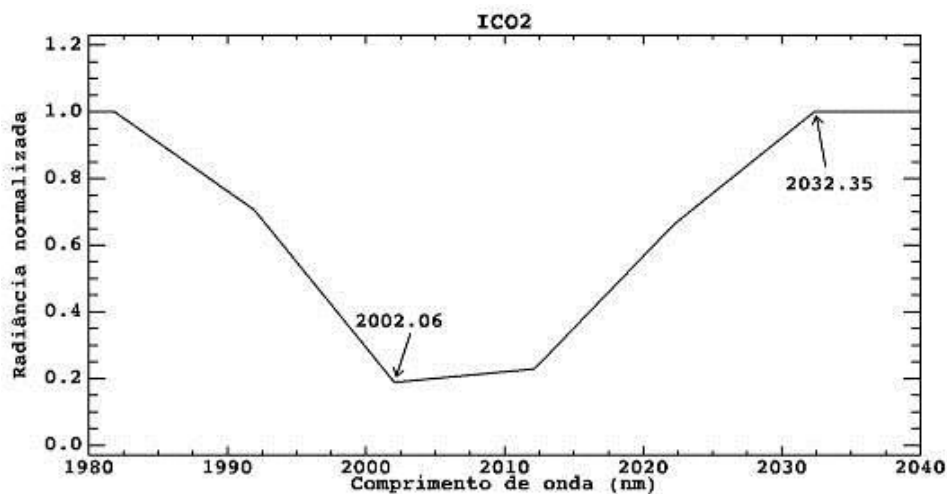
N e R = reflectância do infravermelho próximo e vermelho;

Determinação do Índice de CO₂ Atmosférico

Neste estudo, foi utilizado, a fim de comparação e validação, o índice de determinação do conteúdo de CO₂ no ar atmosférico (ICO₂), para verificar a relação existente entre a absorção e a concentração de CO₂ na coluna do ar atmosférico adjacente às torres micrometeorológicas da área de estudo.

O ICO₂ desenvolvido por Baptista (2004) mede o teor de CO₂ na coluna do ar atmosférico. É determinado pela intensidade da feição de absorção do gás centrada em 2000,00 nm ou (2 μm), por meio da subtração do ponto de máxima radiância de 2032,35 nm (2,032 μm) e do ponto de mínima de radiância de 2002,06 nm (2,00206 μm), adaptado para o Hyperion (Figura III-22).

Figura III-22. Intensidade da feição espectral do CO₂ atmosférico, obtido cena do sensor Hyperion.



Fonte: adaptado de Baptista (2004).

O ICO₂ foi utilizado para verificar o conteúdo de CO₂ atmosférico analisado nas imagens de satélite e compará-lo às concentrações de CO₂ coletadas em campo.

Para efeitos de comparação, foi necessário realizar um processamento nas imagens de radiância. Como os dados de CO₂flux são obtidos pelos índices NDVI e sPRI, que são gerados a partir de imagens de reflectância de superfície e os dados do ICO₂ são obtidos a partir de dados de radiância, para fazer a comparação entre os dados, foi necessário realizar uma normalização dos dados. Para isso, utilizou-se a remoção do contínuo espectral, que reduz os valores para o intervalo de 0 a 1. Os pontos dos espectros resultantes são iguais a 1,0 no qual há ajuste entre o contínuo e os espectros da imagem e menores que 1,0 nos quais ocorrem feições de absorção.

A remoção do contínuo é um meio de normalizar espectros de reflectância para que seja possível a comparação de feições de absorção individuais a partir de um valor de base comum. Uma vez que os resultados dos dois índices que compõem o CO₂flux são baseados na lógica da diferença normalizada. Para a realização dessa etapa, utilizou-se o software ENVI, no módulo *Spectral – Mapping Methods – Continuum Removal*.

Correção Geométrica

O georreferenciamento é obtido como resultado de sua correção geométrica, que é realizada para corrigir as distorções resultantes do sistema de aquisição da imagem e oscilações

na plataforma dos sensores. O procedimento exige comparar os dados com cartas, mapas ou imagens já corrigidas geometricamente.

Os coeficientes da função de mapeamento foram realizados por uma função de mapeamento polinomial de primeira ordem e estimados por meio de um conjunto de pontos que foram registradas tendo como referência a imagem de nível 1Gst Geotiff da *United States Geological Survey* (USGS) referentes às localizações de cada área, conduzidos no programa ENVI 4.8.

Análise Estatística

Neste estudo, foram utilizadas as técnicas de regressão linear, não linear e os testes de hipóteses, geradas a partir dos índices de vegetação com os dados obtidos em campo, a fim de comprovar a similaridade estatística das concentrações médias de CO₂, baseada nos testes de distribuição livre ou testes não paramétricos. Para as análises estatísticas foi utilizado o *software* BioEstat.

As técnicas estatísticas clássicas utilizadas para estimar parâmetros e testar hipóteses possuem exigências claras, como distribuição normal e homogeneidade. Entretanto, muitas variáveis não apresentam esse tipo de distribuição e, às vezes, é difícil de determinar que tipo de distribuição apresenta, pois as amostras nem sempre são suficientemente grandes para tal tipo de avaliação, o mesmo ocorre em relação à homogeneidade de variâncias entre as populações que estão sendo comparadas, muitas vezes as variáveis são heterogêneas, e mesmo transformando os dados não se consegue homocedasticidade (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Para Días e Lopez (2007), os testes não paramétricos são mais apropriados quando não se conhece a distribuição dos dados na população (DÍAS; LÓPEZ, 2007).

Normalidade Shapiro-Wilk, teste W foi utilizado para se verificar a normalidade das variáveis analisadas. O teste W é obtido dividindo-se o quadrado da combinação linear apropriada dos valores ordenados da amostra pela variância simétrica estimada (AYRES, 2007). O teste foi realizado no BioEstat.

Dessa forma, esta análise foi realizada com base na teoria não-paramétrica, uma vez que os dados se apresentam com as características descritas na teoria, pois trata-se de dados cujos perfis estão associados à concentração e fluxo de carbono e índices espectrais de vegetação com amostras relativamente pequenas, devido à insuficiência de informação coincidente entre as variáveis.

As correlações foram analisadas a partir dos coeficientes de Spearman (r_s) para dados não paramétricos e pelas correlações canônicas (R canônico).

O coeficiente de correlação de Spearman indicado por (r_s) varia entre -1 (correlação perfeita negativa) e +1 (correlação perfeita positiva), passando de valor 0 (correlação não linear), porém o r_s indica a correlação entre postos e não entre os valores medidos (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Na análise de correlação canônica, as variáveis espectrais foram consideradas um grupo (Y) e as variáveis medidas diretamente nas torres micrometeorológicas, um outro grupo (X). Para Landim (2011), o princípio básico de uma relação canônica é desenvolver uma combinação linear em cada um dos conjuntos de variáveis de tal modo que a correlação entre os dois conjuntos seja maximizada.

Utilizou-se o critério de avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis conforme Callegari-Jacques (2003), como pode ser visualizado na tabela III-5.

Tabela III-5. Avaliação qualitativa da correlação.

0 Nula	
0,0 — 0,3 Fraca Positiva	0,0 — -0,3 Fraca Negativa
0,3 — 0,6 Regular ou Moderada Positiva	-0,3 — -0,6 Regular ou Moderada Negativa
0,6 — -0,9 Forte Positiva	-0,6 — -0,9 Forte Negativa
0,9 — 0,99 Muito Forte Positiva	-0,9 — -0,99 Muito Forte Negativa
1 Plena ou Perfeita Positiva	-1 Plena ou Perfeita Negativa

Dentre as técnicas não paramétricas, utilizou-se o *Teste U* de *Wilcoxon-Mann-Whitney* para verificar a similaridade entre as variáveis. O teste *U* corresponde ao teste *t* para amostras independentes, sendo as variáveis aleatórias e numéricas.

O Teste de *Mann-Whitney*, conhecido também como *Teste U* de *Wilcoxon-Mann-Whitney*, é uma prova não paramétrica destinada a comparar duas amostras independentes do mesmo tamanho ou desigual. É uma alternativa não-paramétrica do teste *t-Student* para as populações normais (AYRES, 2007). Foi desenvolvido, primeiramente por F. Wilcoxon, em 1945, para comparar tendências centrais de duas amostras independentes de tamanhos iguais. Em 1947, H.B. Mann e D.R. Whitney generalizaram a técnica para amostras de tamanhos diferentes (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

IV. Resultados e Discussão

Medições Diretas de Concentração e Fluxo de CO₂

Na Amazônia Brasileira, estudos sobre a assimilação e liberação de CO₂ vêm sendo desenvolvidos para entender as relações biosfera-atmosfera, destacando-se as mensurações diretas de concentrações e de fluxos de CO₂ nas florestas tropicais. No tocante à técnica empregada, destaca-se o método de covariância dos vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*). Trata-se de um método de medição direta, confiável e aprovado para densidade de fluxo de gases traços, como por exemplo, o CO₂ na relação entre biosfera e atmosfera nas florestas tropicais (SANTOS, 1999; GRACE et al., 1995; LEAL, 2000; SILVA JUNIOR, 2003 e AGUIAR, 2005).

Em vista disso, o método de covariância dos vórtices turbulentos permite a medição do fluxo vertical de CO₂, utilizando o cálculo da covariância entre flutuações da velocidade vertical do vento e concentrações de CO₂. Baseando-se nos redemoinhos que sucedem na atmosfera, uma vez que turbilhões mais aquecidos e mais úmidos (gerados na superfície são deslocados verticalmente) são substituídos por turbilhões menos aquecidos e mais ou menos úmidos. Assim, turbilhões menos aquecidos e menos úmidos são responsáveis pelo transporte vertical das propriedades da atmosfera, no caso do CO₂ e dos fluxos de calor sensível e latente (SILVA JUNIOR, 2003).

Compreender o comportamento do CO₂ nos diferentes ambientes, seja em florestas tropicais, seja em áreas de intervenção antrópica é essencial para deduzir como essa dinâmica pode estar correlacionada às análises espectrais da vegetação do sensor Hyperion para detecção do sequestro florestal de carbono e do conteúdo de CO₂ atmosférico, que são objetos principais deste estudo. Nessa análise, foram utilizados os dados obtidos a partir de informações aferidas das torres micrometeorológicas junto aos escritórios do LBA e do banco de dados disponíveis na rede Fluxnet, de medição direta de concentração (ppm) e fluxo ($\mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) de CO₂ na Amazônia Brasileira.

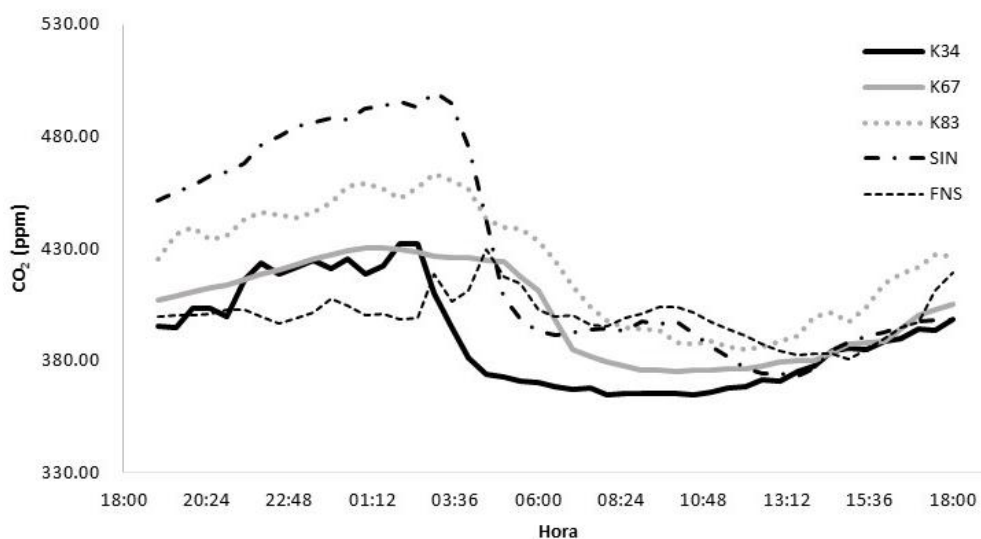
A figura IV-1 demonstra que, no período de 2001 a 2005, os valores das concentrações média de CO₂ foram cíclicos, em todos os pontos amostrados nas florestas primárias (K34, K67 e SIN), floresta primária com atividade de exploração seletiva de madeira (K83) e área de pastagem (FNS), com variações de concentração em cada torre medida. Os períodos diurno e noturno possuem características bastante diferenciadas quanto ao comportamento do CO₂.

Assim, durante a noite, a concentração de CO₂ na atmosfera é alta, sendo que ao longo do dia, a concentração de dióxido de carbono é baixa com pequenas variações, devido às condições meteorológicas no dia que foram coletadas. O que permitiu detectar que a vegetação está sequestrando o CO₂ atmosférico, tanto nos pontos amostrados nas florestas primárias, e florestas com atividade de exploração seletiva de madeira, quanto na área de pastagem. A variação da concentração de CO₂ nas amostras das florestas primárias k34, k67 e SIN oscilaram em torno de 390 ppm, 402 ppm e 427 ppm, respectivamente. A medição realizada na floresta com atividade de exploração seletiva de madeira indicou uma concentração média de CO₂ de 423 ppm. Quanto à variação da concentração de CO₂ na área de pastagem, em média, ficou em torno de 399 ppm.

Os resultados analisados na figura IV-1 eram esperados para as florestas primárias (K34, K67 e SIN), que durante o dia realizam o processo de fotossíntese e esses ambientes, tendem a ser mais eficientes no sequestro florestal de carbono, do que as áreas de intervenção antrópicas.

De um modo geral, as concentrações nos pontos amostrados parecem estar relacionadas com estudos que demonstraram a importância das florestas tropicais como sumidouros e emissores de CO₂. Esse é o padrão esperado e observado por outros autores. As medições realizadas por Santos (1999), utilizando dados de uma torre micrometeorológica indicam que a floresta tropical atua como sumidouro de CO₂ durante o dia. Esse autor detectou que as concentrações de CO₂ são elevadas no período noturno, em torno de 450 ppm, indicando que a floresta é uma emissora de CO₂. Segundo medições de Leal (2000), o CO₂ possui um comportamento com variação cíclica. Nota-se que ocorre uma maior concentração de CO₂ no período noturno e uma diminuição ao longo do dia. Silva Junior (2003) indicou haver uma relação análoga entre a concentração de CO₂ tanto nas florestas tropicais, quanto na pastagem. Embora a variação da concentração de CO₂ oscilasse com máxima de 532,6 ppm na madrugada, e mínima de 367,4 ppm no período da tarde, em torno das 15:00 horas.

Figura IV-1. Ciclo diário da concentração média de CO₂ em diferentes ambientes naturais e antropogênicos na Amazônia Brasileira.

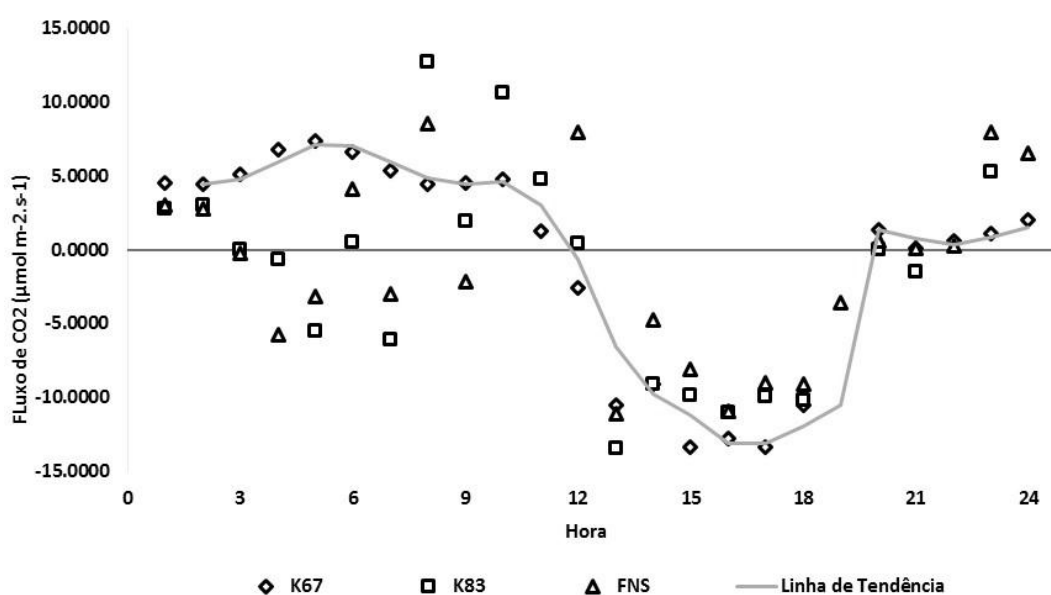


Na figura IV-2, observa-se a tendência do comportamento do fluxo de CO₂ nos pontos amostrados nas florestas primárias e floresta primária com atividade de exploração seletiva de madeira e área de pastagem. Com base nas medidas feitas no ciclo de 24 horas, este estudo mostra que, no período diurno, o fluxo de CO₂ tende a ser predominantemente negativo, significando que tanto a floresta, quanto a pastagem assimilam CO₂ da atmosfera. Assim, à noite, o fluxo de CO₂ inverte-se, tornando-se positivo e indicando que os mesmos ambientes emitem CO₂ para a atmosfera.

O comportamento típico da concentração de CO₂ foi estudado por Aguiar (2005), quando foi observado que o fluxo positivo do CO₂ é maior à noite, quando as emissões do solo e a respiração combinam-se como uma fonte de emissão de CO₂ para a atmosfera, enquanto que no período diurno, o CO₂ atmosférico é absorvido pela vegetação, e as reações fotoquímicas começam a ocorrer de maneira mais intensa. De acordo com Grace et al. (1995), a variação do fluxo de CO₂ na floresta tropical varia conforme as condições meteorológicas ao longo do dia. À noite, a variação do CO₂ depende, em grande parte, das condições meteorológicas presentes no dia antecedente. Segundo Santos (1999), as concentrações de CO₂ são sempre maiores à noite, enquanto o fluxo de CO₂ (na maioria das vezes) é maior durante o dia, quando as concentrações de CO₂ estão vinculadas aos processos fotossintéticos, enquanto que os fluxos de CO₂ possuem relação com o movimento do ar e a turbulência. Análises feitas por Silva Junior (2003) indicam que o comportamento do fluxo de CO₂ nas florestas tropicais é análogo ao da pastagem.

Portanto, a análise da concentração e do fluxo de CO₂ mostra uma dinâmica cíclica no comportamento de CO₂. Assim, o comportamento do CO₂ é similar de um modo geral, entretanto apresenta diferenças sutis entre os ambientes estudados, tanto em florestas primárias e florestas com atividade de exploração seletiva de madeira, quanto em pastagem. Por essa razão, este estudo fornece subsídios para determinar a melhor abordagem para validar as modelagens espectrais, quando utilizadas na verificação de sequestro florestal de carbono, por meio processamento digital de imagens hiperespectrais.

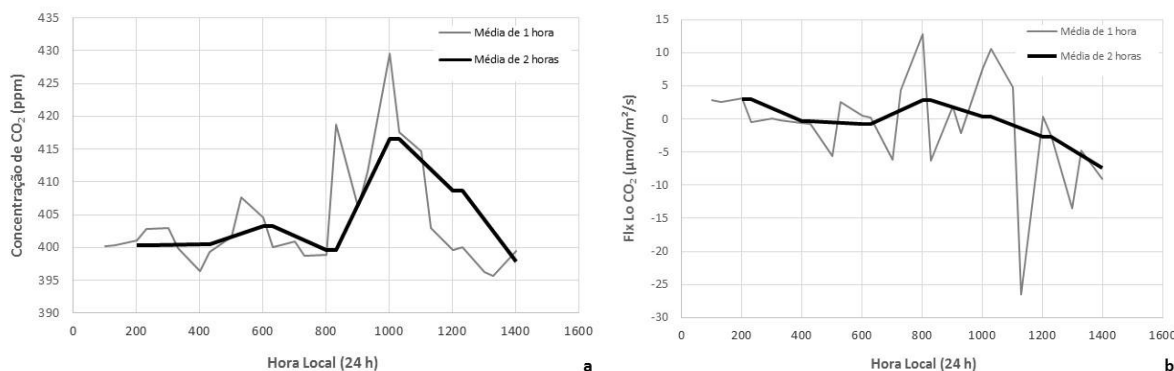
Figura IV-2. Ciclo diário do fluxo médio de CO₂ em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira.



Na figura IV-3, dados de concentração e fluxo de CO₂ medidos nas torres micrometeorológicas, usando um intervalo de uma (1) hora no período diurno e em horários da passagem do satélite EO-1 Hyperion. Desse modo, utilizou-se a análise espectral, e, conseqüentemente, o parâmetro com média de dados a cada duas (2) horas. Vale ressaltar que a passagem do sensor Hyperion ocorreu no período das 9h às 12h, nos sítios experimentais (K34, K67, K83, FNS e SIN), ao mesmo tempo em que, as medidas diretas de CO₂ apresentavam baixas concentrações e um decréscimo de fluxo na região.

A concentração e fluxo de CO₂ obtidos nos pontos amostrados K34, K67, K83, FNS e SIN foram padronizados para 1 e 2 horas de observação e correlacionados aos índices espectrais de vegetação, visando refinar a análise dos dados.

Figura IV-3. Flutuação dos dados, a cada uma hora e duas horas: a) concentração e b) fluxo de CO₂.



Modelagem Hiperespectral do Sequestro Florestal de Carbono

Desde a década de 80, estudos que envolvem sensoriamento remoto por meio dos índices de vegetação e CO₂ eram desenvolvidos em diferentes ecossistemas terrestres. Box et al. (1989) aplicaram a correlação entre fluxo de CO₂ e índice NDVI usando o sensor AVHRR. Nesse trabalho, foi observado que a relação entre as variáveis era baixa, devido aos efeitos da sazonalidade e da sensibilidade do saldo líquido de CO₂ encontrados em determinadas partes no mundo. Nos estudos para floresta boreal com povoamento florestal e solos relativamente homogêneos, na região central do Canadá (Estados Unidos), Rahman et al. (2000) alcançaram seus resultados satisfatórios por meio do CO₂flux. Esse índice foi desenvolvido a partir de imagens do sensor AVIRIS. Os autores encontraram uma alta correlação entre o CO₂flux com dados de fluxo de CO₂ de 06 torres micrometeorológicas. Posterior a esse estudo, Baptista (2003) observou que o CO₂flux pode mensurar a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação na fase clara da fotossíntese.

Neste estudo, a modelagem do sequestro florestal de carbono foi derivada dos índices espectrais de vegetação obtidos pelo sensor hiperespectral Hyperion. Para uma análise consistente da correlação entre variáveis espectrais (NDVI, EVI e EVI2, CO₂flux), concentração e fluxo de CO₂ nas florestas primárias, floresta primária com atividade de exploração seletiva de madeira e área de pastagem, torna-se relevante a submissão dos dados do sensor Hyperion às seguintes etapas de pré-processamentos digitais: 1) correção atmosférica das imagens que utilizaram índices no comprimento de onda no VNIR, 2) redução de ruído pelo MNF e 3) correção geométrica aplicados as 21 imagens hiperespectrais do estudo.

Correção Atmosférica

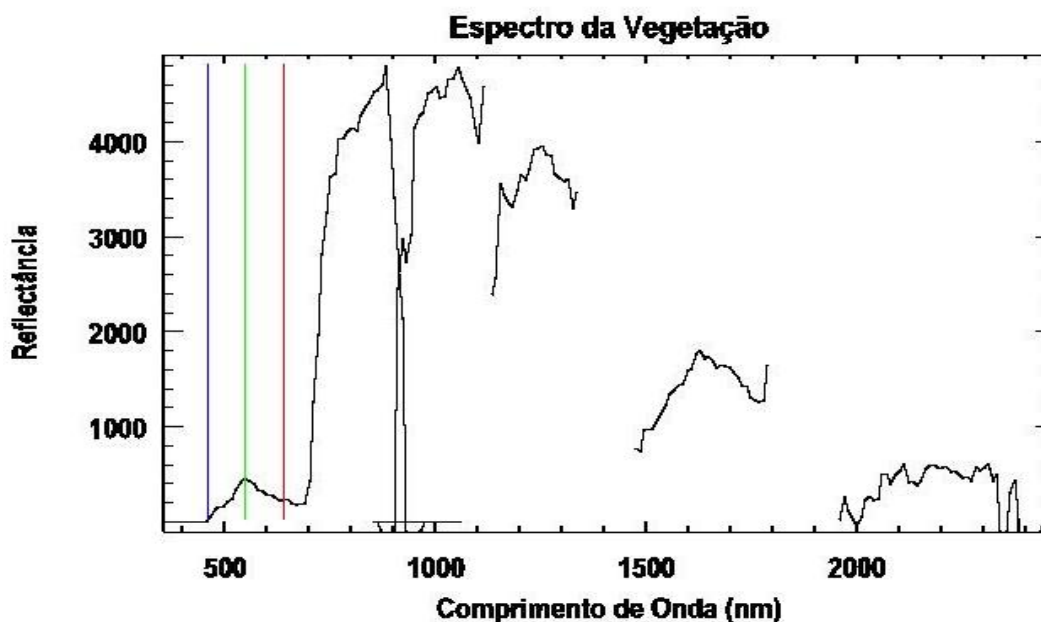
É importante enfatizar que, para utilizar os índices de vegetação, principalmente o NDVI, é necessário, primeiramente, realizar a correção atmosférica e, em seguida, reduzir os dados de radiância para reflectância de superfície, pois ambos índices se baseiam em dados de reflectância.

Em detrimento da atmosfera, os principais efeitos observados nas imagens de satélite estão relacionados à diminuição da faixa de valores digitais registrados pelo sensor, à diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e à alteração do brilho na imagem (ZULLO Jr, 1994). Na maioria das vezes, os modelos desenvolvidos para as imagens hiperespectrais adicionam, na sua formulação, os códigos de transferência radiativa atmosférica. Dentre esses códigos, os mais difundidos são o 5S, 6S, LOWTRAN e MODTRAN (LATORRE et al., 2001). Assim, para atenuar os efeitos atmosféricos nas imagens Hyperion, utilizou-se o FLAASH, que emprega o código de transferência radiativa MODTRAN (LATORRE et al., 2002). Portanto, a utilização desse modelo em alguns trabalhos propiciou resultados satisfatórios para a utilização dos dados nas imagens de satélites, pois diminuiu os efeitos atmosféricos entre superfície e sensor (LATORRE et al., 2001 e GOMES et al., 2013).

O FLAASH fornece uma boa derivação do método para correção atmosférica, baseando-se no albedo da superfície, altitude de superfície, coluna d'água, vapor e aerossóis, superfície e temperatura. Essas informações foram utilizadas para o cálculo dos valores de radiância e reflectância das superfícies terrestres. O parâmetro de visibilidade foi inicialmente estimado e reajustado até que os espectros de reflectância fossem condizentes com o comportamento espectral tipicamente conhecido de alguns alvos.

A figura IV-4 apresenta o espectro obtido com o método FLAASH e a remoção das bandas de absorção de água, localizadas em 1,4 μm e 1,9 μm . Verificou-se a conversão de dados de radiância para valores de reflectância de superfície que foram utilizados para verificação dos índices de vegetação (NDVI, EVI, e EVI2) obtidos das imagens de satélite.

Figura IV-4. Espectros de reflectância de um pixel de vegetação extraído de uma cena do sensor Hyperion após correção atmosférica pelo método FLAASH.



Kruse (2004) realizou um estudo comparativo entre os métodos de correção atmosférica ATREM, ACORN e FLAASH, e os resultados foram análogos. Entretanto, o FLAASH é mais flexível para os dados hiperespectrais.

Em relação ao modelo MODTRAN, o estudo de Gomes et al. (2013) apontou valores de refletâncias com correção atmosférica mais apurada, por corrigir melhor os efeitos de absorção atmosférica. Segundo esses autores, os valores de NDVI dos alvos nas imagens corrigidas foram mais altos que os das imagens não corrigidas. A reflectância corrigida apresentou valores mais altos no espectro infravermelho e valores mais baixos no espectro visível, especialmente na banda do azul. Assim, os resultados indicam que a correção atmosférica foi realizada de maneira satisfatória. Portanto, os resultados apresentados corroboram os autores Kruse (2004) e Gomes et al. (2013), inferindo que a correção atmosférica utilizando elementos físicos pelo modelo MODTRAN foi eficaz para a identificação do conteúdo vegetativo do dossel da floresta, quanto para as áreas com menor biomassa vegetal nas imagens do Hyperion.

Minimum Noise Fraction (MNF)

Galvão et al. (2013) afirmam que as imagens Hyperion têm menor relação sinal-ruído (SNR) do que a maioria dos sensores hiperespectrais aerotransportados.

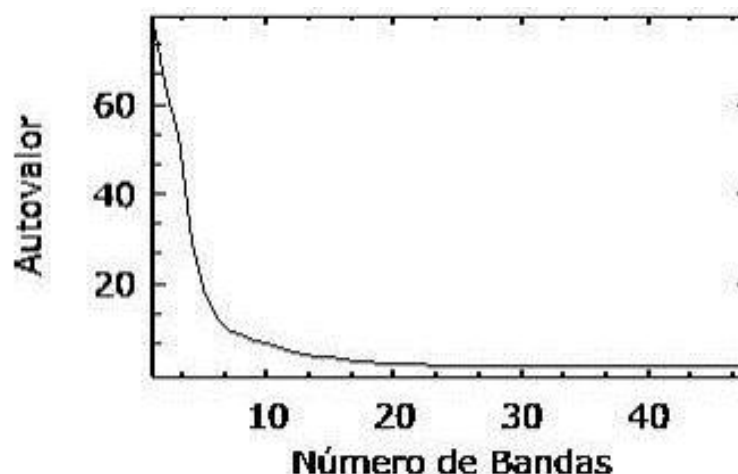
Uma das tarefas fundamentais na exploração de dados hiperespectrais é encontrar a forma mais pura do espectro de determinados alvos. Esse objetivo pode ser alcançado utilizando-se a transformação por *Minimum Noise Fraction (MNF)*, essencial no processamento desse tipo de imagens (AHMAD, 2012).

As imagens do sensor Hyperion podem fornecer medidas eficazes de desempenho agrícola através do uso de índices espectrais, por exemplo, se o ruído sistemático e aleatório for corrigido (DATT et al., 2003). Os autores utilizaram as técnicas de *destriping*, correção atmosférica e MNF, para corrigir esses problemas apontando resultados melhorados.

Neste estudo, o pré-processamento do MNF foi dividido em duas etapas, para calcular dois índices inversamente proporcionais (CO_2flux e ICO_2). Para o cálculo de CO_2flux que envolve a análise com os índices NDVI, EVI e EVI2, utilizaram-se, apenas as bandas radiometricamente calibradas de 8 a 55 e para o cálculo de ICO_2 , as bandas de 79 a 224.

Na figura IV-5, verifica-se que a fração do sinal/ruído é determinada com relação ao comportamento dos autovalores "*eigenvalues*", que expressam a variância das bandas na imagem. O limite estabelecido entre as informações nas imagens de satélite que continham dados com ruído foi o ponto de inflexão no gráfico, que corresponde às demais bandas a partir das 8 primeiras componentes do MNF. Assim, o resultado da transformação se deve à redução na dimensionalidade dos dados e à separação das imagens entre sinal e ruído.

Figura IV-5. Comportamento dos autovalores da imagem 2001 307 (VNIR), referente à localização da torre k83 em Santarém-PA.



Concordando com Baptista (2003), o resultado da transformação MNF, aplicado às 48 bandas (8 a 55 do VNIR) e às 146 bandas (79 a 224 do SWIR) do sensor Hyperion apresentou autovalores mais elevados para 8 e 18 primeiras componentes MNF, respectivamente. Deste modo, as bandas do VNIR são responsáveis por 78,7%, e as bandas do SWIR, por 50,83% da variância dos dados (Tabela IV-1).

Tabela IV-1. Autovalores e percentual de variância da imagem 2001 307 (k83), para as primeiras 8 e 18 componentes das bandas VNIR e SWIR.

	Banda MNF	Autovalor	%		Banda MNF	Autovalor	%
VNIR	1	77.4528	22.77	SWIR	1	43.6571	13.42
	2	61.6453	18.12		2	35.9142	11.04
	3	52.5344	15.45		3	28.3672	8.72
	4	29.0700	8.55		4	9.1072	2.80
	5	18.4143	5.41		5	6.4192	1.97
	6	11.9267	3.51		6	5.9274	1.82
	7	8.5989	2.53		7	5.6965	1.75
	8	8.2051	2.41		8	4.3636	1.34
		78.75	9		3.7597	1.16	
			10		3.0536	0.94	
			11		2.9049	0.89	
			12		2.7046	0.83	
			13		2.6722	0.82	
			14		2.3201	0.71	
			15		2.2113	0.68	
			16		2.1783	0.67	
			17		2.1023	0.65	
			18		2.0660	0.63	
					50.84		

Segundo Williams e Hunt Jr. (2002), as transformadas MNF são semelhantes a uma análise de componentes principais. No trabalho realizado na região nordeste dos Estados Unidos, verificou-se que as primeiras 12 imagens MNF continham a maior parte da informação da imagem AVIRIS. Os autores utilizaram o método associado a outras técnicas de processamento para estimar a cobertura vegetal de uma erva daninha.

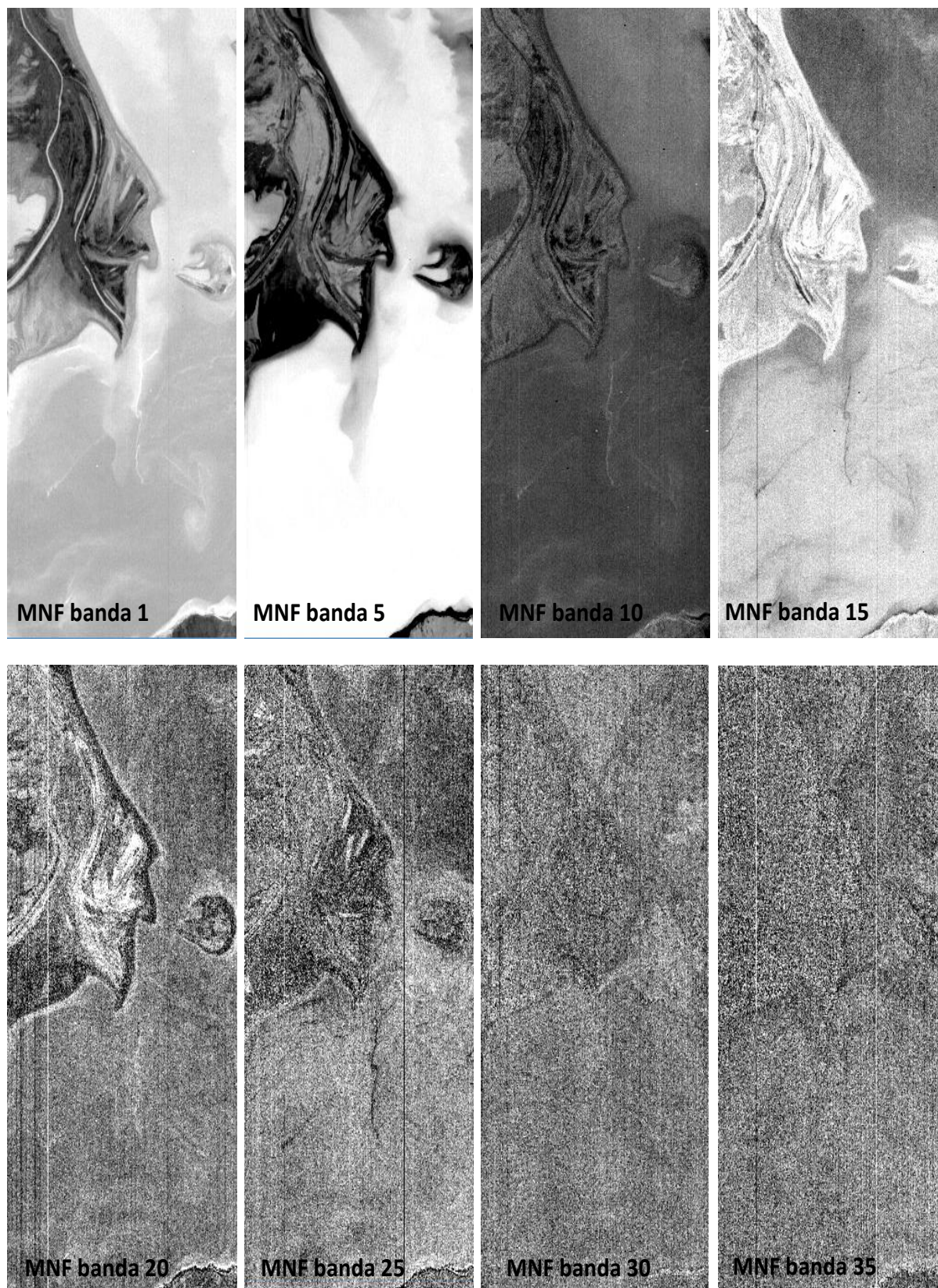
Após a transformação por MNF, realizou-se a transformação inversa sobre as 8 primeiras bandas MNF, no caso, para a imagem 2001 307, a fim de diminuir o ruído dos dados. Esse procedimento foi repetido para todas as 21 imagens Hyperion para ambos comprimentos de onda (VNIR e SWIR).

A transformação por MNF considera a ordem inversa da saída das componentes, conciliando os procedimentos de segregação da componente ruído e as componentes de redução da dimensionalidade dos dados. Depois da aplicação do MNF, as inversas MNF ficam ordenadas de acordo com a qualidade do sinal, facilitando a separação das frações ruidosas (Figura IV-6).

O método MNF foi desenvolvido para eliminar a alta correlação com o mínimo de perda de informação, em um princípio estatístico de redução de dados, tornando evidentes feições que não eram percebidas visualmente. Na figura IV-6, as quinze primeiras bandas apresentam uma significância dos dados, e, depois da banda 20, resta apenas ruído.

Carvalho-Junior et al. (2002) afirma que as imagens geradas com o processo de inversão do método de MNF apresentam espectros límpidos de ruído, pois as primeiras bandas compõem cerca de 90% das informações, e o restante são ruídos.

Figura IV-6. Degradação do sinal ao longo das componentes MNF da imagem 2001 307, referente à localização da torre k83 em Santarém-PA.



Correção Geométrica

A correção geométrica das imagens foi essencial para relacionar os dados derivados dos índices espectrais do sensor Hyperion com os dados de concentração e fluxo de CO₂, medidos pelas cinco torres micrometeorológicas na Amazônia Brasileira. As coordenadas geográficas das cinco torres (K34, K67, K83, FNS e SIN) foram obtidas nos escritórios do LBA e com uso de GPS, em alguns sítios experimentais, utilizando o *datum* WGS-84. O registro das imagens foi realizado a partir de imagens de referência, por meio dos pontos de controle, que corresponderam ao mesmo objeto nas duas imagens. A imagem de referência correspondeu à banda 30 do sensor Hyperion já georreferenciada de nível 1Gst Geotiff da United States Geological Survey (USGS).

Os coeficientes da função de mapeamento foram realizados por uma função de mapeamento polinomial de primeira ordem e estimados por meio de pontos de controle GCP (*ground control points*). A acurácia (RMS=0,6066) do georreferenciamento para todas as imagens registradas foi menor que a resolução espacial de um pixel. O erro médio quadrático - RMS (*root mean square*) é expresso em números de pixels (Tabela IV-2).

Tabela IV-2. Parâmetros das imagens Hyperion registradas.

Nome das Torres LBA	N. Amostra	Dia e Ano Juliano	Registro de Imagens		
			RMS = 0.6066000	N. Pontos	Polinômio
K34	1	2002 219	0.9586770	16	1º.Grau
	2	2002 226	0.9418130	18	1º.Grau
	3	2002 315	0.4909150	18	1º.Grau
	4	2003 174	0.9284630	16	1º.Grau
	5	2005 218	0.8663840	16	1º.Grau
K83	6	2001 211	0.4966030	15	1º.Grau
	7	2001 227	0.6480440	20	1º.Grau
	8	2001 307	0.4983300	20	1º.Grau
	9	2002 189	0.5800440	20	1º.Grau
	10	2002 221	0.5421830	21	1º.Grau
	11	2003 137	0.5376310	20	1º.Grau
	12	2003 185	0.4543110	25	1º.Grau
	13	2003 233	0.8007920	20	1º.Grau
K67	14	2002 189	0.5494870	23	1º.Grau
	15	2002 269	0.2919180	18	1º.Grau
	16	2002 285	0.3053710	16	1º.Grau
	17	2003 233	0.4845980	17	1º.Grau
	18	2005 206	0.6133870	17	1º.Grau
FNS	19	2003 220	0.8475800	23	1º.Grau
	20	2003 236	0.6007760	23	1º.Grau
SIN	21	2002 191	0.3014390	20	1º.Grau

A média do erro dos dados processados para correção geométrica está de acordo com as recomendações de Liu (2006), pois se, o erro estivesse acima de um pixel, deveriam ser acrescentados mais pontos de controle para melhorar a acurácia do georreferenciamento.

A reamostragem adotou o método do vizinho mais próximo, visando preservar os valores radiométricos da cena original. Meneses e Almeida (2011) sugerem a interpolação com reamostragem com o método vizinho mais próximo, também conhecida como interpolação de ordem zero, quando se transfere para a imagem reamostrada o valor de brilho do pixel da imagem original que estiver mais próximo. Essa reamostragem possui uma vantagem principal que é a rapidez de processamento e não há alteração nos valores radiométricos da imagem original.

Determinação do CO₂flux a partir dos índices NDVI, EVI e EVI2

Como as torres micrometeorológicas estão localizadas em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira (floresta primária, floresta manejada e pastagem), fez-se necessária a verificação de qual melhor índice (NDVI, EVI e EVI2) aplicar para verificação do sequestro de carbono. Os índices de vegetação combinam a informação espectral, geralmente, em duas bandas do espectro eletromagnético, o resultado da assinatura espectral característica de uma vegetação verde e sadia é um contraste entre a região do visível, especificamente do vermelho e do infravermelho próximo (SHIMABUKURU et al., 1998).

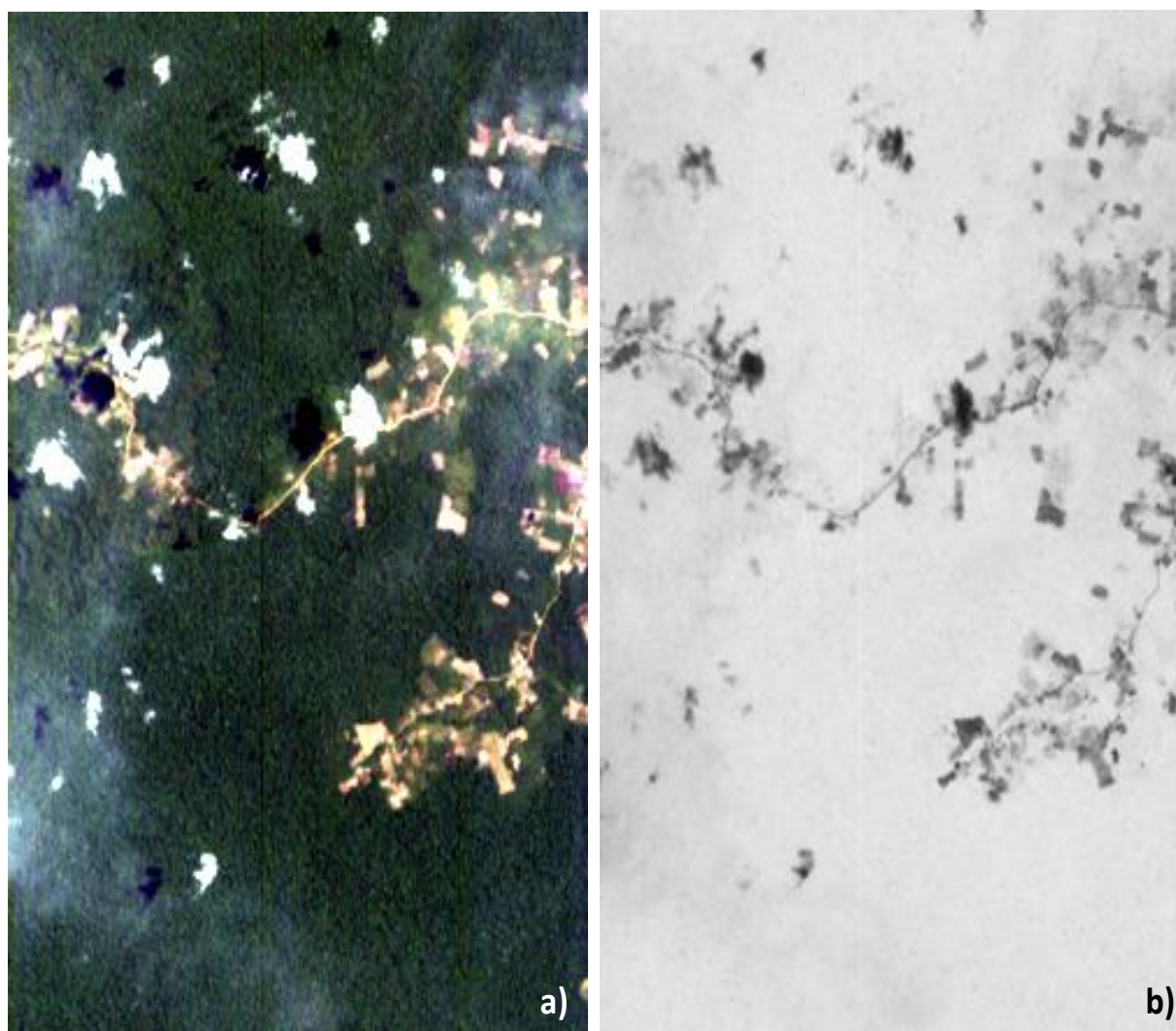
O índice de vegetação mais empregado na avaliação do vigor da cobertura vegetal é o NDVI, que vem sendo largamente utilizado em estudos ambientais e que utiliza a energia refletida na região do infravermelho próximo e a refletida na região do vermelho no espectro eletromagnético para estimam indiretamente o crescimento de biomassa e produtividade vegetal.

Quando se utilizam as imagens NDVI, os valores variam de -1 a +1, sendo os tons mais claros relacionados aos maiores valores e os tons mais escuros aos valores mais baixos. Os valores positivos encontrando nas áreas caracterizada pela vegetação fotossinteticamente ativa. Deste modo, quanto mais próximo de +1, maior será a densidade da cobertura vegetal. Objetos que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água, alvos urbanos) apresentam NDVI negativo. Outros materiais como solos descobertos e rochas refletem o vermelho e o infravermelho próximo

quase na mesma intensidade, seu NDVI aproxima-se de zero (YIN; WILLIAMS, 1997; RIZZI, 2004).

Na figura IV-7, verifica-se a composição colorida de uma imagem Hyperion e a imagem NDVI processada. Nota-se que as áreas mais escurecidas na imagem estão relacionadas às áreas com menor biomassa vegetal, geralmente, solo exposto, áreas de pastagens, culturas agrícolas e nuvens. O entendimento que as áreas mais claras apresentam o teor de biomassa existente na área, onde as maiores concentrações desses valores estão associados às florestas densas, extrato arbóreo e arbustivos. Logo, o NDVI permitiu identificar a presença de vegetação verde na superfície e caracterizar sua distribuição espacial na cena Hyperion.

Figura IV-7. Índice de Vegetação NDVI de uma imagem Hyperion na torre K67, 2002 269: a) composição colorida e b) imagem NDVI.



Na tabela IV-3, os valores do NDVI caracterizados nas cinco torres micrometeorológicas na Amazônia Brasileira. Esses valores mostram que, nas florestas primárias (K34, K67 e SIN) e com atividade de exploração seletiva de madeira (K83), os valores de NDVI são elevados, mantendo uma média em torno de 0,820, com pequenas variações no tempo, devido às épocas do ano em que foram medidas (dias mais chuvosos e dias mais seco). Na área de pastagem (FNS), a variação do NDVI foi mais intensa, alcançando uma diferença de aproximadamente 0,514, com valores médios de 0,306. Isso pode ser explicado devido às condições ambientais encontradas nos pontos amostrados. As áreas de pastagens são áreas mais secas, com maior carência de água. Diferentemente das florestas primárias, devido a uma quantidade maior de biomassa.

Esses valores de relacionados ao valor de um NDVI são pixel da imagem, o que equivale a uma área de 30 metros onde estão localizadas as torres micrometeorológicas. Os valores elevados de NDVI evidenciam áreas com alta biomassa vegetal, como as florestas primárias e áreas de exploração seletiva de madeira. Valores mais baixos de NDVI evidenciam aumento das atividades antropogênicas como por exemplo, as pastagens.

Tabela IV-3. Valores de NDVI para os pontos das torres.

Torre	Dia e Ano Juliano	NDVI
K34 (Floresta Primária)	2002 219	0.860
	2002 226	0.890
	2002 315	0.844
	2003 174	0.859
	2005 218	0.910
K83 (Exploração Seletiva de Madeira)	2001 211	0.859
	2001 227	0.778
	2001 307	0.831
	2002 189	0.853
	2002 221	0.886
	2003 137	0.724
	2003 185	0.859
K67 (Floresta Primária)	2003 233	0.879
	2002 189	0.850
	2002 269	0.892
	2002 285	0.733
	2003 233	0.864
FNS (Pastagem)	2005 206	0.869
	2003 220	0.319
SIN (Floresta de Transição Amazônia-Cerrado)	2003 236	0.294
	2002 191	0.850

Os resultados da tabela IV-3 corroboram os resultados de Nascimento (2012), os valores encontrados mostram que, nas florestas primárias, o NDVI oscila em torno de 0,888.

Trata-se de regiões com uma quantidade maior de conteúdos de água do solo e da biomassa verde, enquanto que, na área de pastagem, a variação do NDVI é mais drástica, alcançando uma diferença de aproximadamente 0,3, com valores máximos e mínimos de 0,736 e 0,443. A explicação foi a intensificação da seca que afetou o crescimento da pastagem, ou também por estar relacionada às atividades de queimadas na área, que reduzem drasticamente os valores de NDVI.

O NDVI tem sua eficiência diminuída quando o alvo possui elevada biomassa, devido ao fenômeno de saturação no caso de dosséis densos e multiestratificado. Esse índice se estabiliza em um patamar apresentando um mesmo valor, apesar do aumento da densidade do dossel (GRAÇA, 2006; ZANZARINI et al., 2013). A redução no efeito de saturação aumenta a precisão observada na estimativa dos parâmetros biofísicos da vegetação (HUETE, 1988; HUETE et al., 2002).

Como análise comparativa, utilizaram-se os índices de vegetação melhorado (EVI e EVI2). Esses índices são utilizados para indicar o vigor vegetativo e proporciona uma sensibilidade melhorada em regiões de alta biomassa, minimizando as influências do solo e da atmosfera. O EVI é um índice que possui coeficientes adicionados para melhorar a extração dos sinais da vegetação. Os coeficientes utilizados para o cálculo do EVI foram extraídos de acordo com o trabalho de Huete et al. (1997), onde o fator de ajuste do solo (L) obtém valor 1, o fator de ganho (G) usado foi o 2,5, e os coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera (C1 e C2) foram respectivamente 6 e 7,5 (SCHRAMM; VIBRANS, 2007).

O EVI tem sido utilizado nas mais diversas investigações científicas onde é possível relacionar elementos meteorológicos e vegetação, fornece valores úteis à modelagem numérica, além de ser uma ferramenta essencial no estudo de variações interanuais da vegetação em função de variações no clima. A utilização do EVI como indicador da biomassa verde é bastante viável (RIBEIRO et al., 2009). Porém o EVI utiliza a banda azul na sua formulação e para efeitos comparativos com outros índices, essa solução não seria muito aplicável. O EVI2 não usa a banda do azul, mas baseia-se nos mesmos princípios de atenuação da interferência de *background*, bem como de efeitos atmosféricos que motivaram a construção do EVI.

Os dados de NDVI, EVI e EVI2 foram submetidos à análise estatística descritiva, calculando-se a média, variância, desvio-padrão e o coeficiente de variação. Para essa análise descritiva, utilizou-se o aplicativo BioEstat. O NDVI torna-se saturado em áreas altamente

vegetadas e não responde à variação no infravermelho próximo, quando a reflectância na faixa do vermelho é baixa. No entanto, os índices EVI e EVI2 permanecem sensíveis à variação de reflectância no infravermelho próximo, quando a reflectância na banda vermelha é baixa (JIANG et al., 2008).

O NDVI apresenta valores médios em torno de 0,795 (com desvio padrão de 0,169), apesar de o EVI e o EVI2 apresentarem as mesmas tendências, os valores de EVI2 com média de 0,444 (com desvio padrão de 0,114), e EVI com média de 0,416 (com desvio padrão de 0,111). Esses últimos dois índices apresentam valores menores do que aqueles verificados no índice NDVI, para os mesmos dias observados. O coeficiente de variação de NDVI foi o mais baixo, 21,3%, enquanto que o EVI2 apresentou 25,7% e o EVI, 26,6% (Tabela IV-4).

Tabela IV-4. Estatística descritiva para os índices NDVI, EVI e EVI2.

ATRIBUTOS	Índices de Vegetação		
	NDVI	EVI	EVI2
Tamanho da amostra	21	21	21
Mínimo	0.294	0.173	0.194
Máximo	0.910	0.548	0.576
Média	0.795	0.416	0.444
Variância	0.029	0.012	0.013
Desvio Padrão	0.169	0.111	0.114
Erro Padrão	0.037	0.024	0.025
Coeficiente de Variação	21.3%	26.6%	25.7%

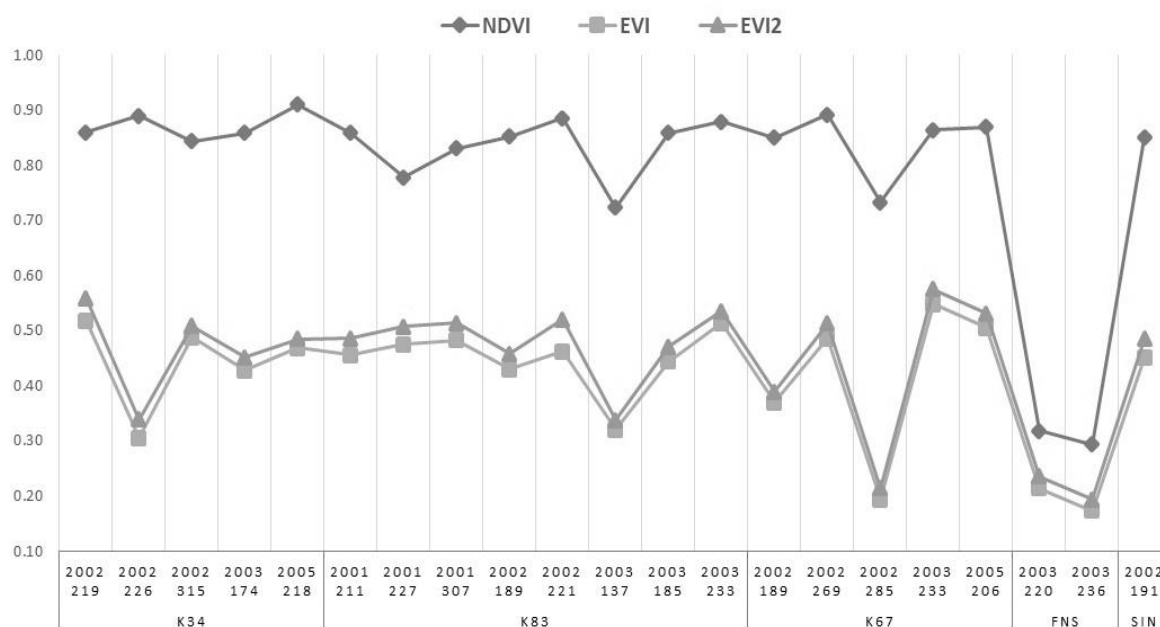
Os dados representados na tabela IV-4 mostram que o índice NDVI possui os maiores valores no pixel em relação aos outros dois índices EVI e EVI2. Apesar de apresentar alguns valores baixos, uma vez que os dados das cinco torres divergem na localização, nos tipos de ambientes e datas. Apesar disso, não houve valores negativos em nenhum dos índices. A observação corrobora Liu (2007), que aponta que valores negativos representam nuvens e valores ao redor de zero representa o solo nu ou sem vegetação.

Na figura IV-8, observa-se valores elevados de NDVI em relação aos índices EVI e EVI2, que possuem valores no pixel mais baixos. Os valores de NDVI para as torres K34, K67, K83 e SIN são elevados, com média em torno de 0,847, o que corresponde aos valores encontrados para áreas de elevada biomassa vegetal (XIAO, et al., 2004; NASCIMENTO, 2012; PEDROZA DA

SILVA; BAPTISTA, 2013). O NDVI possui variações ao longo da escala temporal, devido às medições que foram realizadas em dias mais chuvosos e mais secos.

O comportamento se mantém em relação ao valores de EVI e EVI2 para as mesmas áreas de floresta. Os índices melhoram a capacidade de detecção em regiões com maiores densidades de biomassa, uma vez que proporciona uma melhor sensibilidade e reduz a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel da floresta, que pode ser observado nas médias do índice EVI, em torno de 0,440, e EVI2 em torno de 0,468. Na área da torre FNS, com áreas abertas e vegetação mais seca, tanto o NDVI, quanto os índices EVI e EVI2 apresentaram valores baixos, com médias de 0,306; 0,194 e 0,215, respectivamente.

Figura IV-8. Comportamento dos índices de vegetação NDVI, EVI e EVI2 do sensor Hyperion, coincidentes com os dados disponíveis das torres micrometeorológicas.



O uso dos índices de vegetação EVI e EVI2, apesar de partir do mesmo pressuposto teórico, foi utilizada, devido à subestimação dos valores de EVI2, enquanto que o EVI apresenta valores intermediários, entre EVI2 e o NDVI encontrados no estudo de Pedroza da Silva e Baptista (2013) para áreas de florestas primárias na Amazônia.

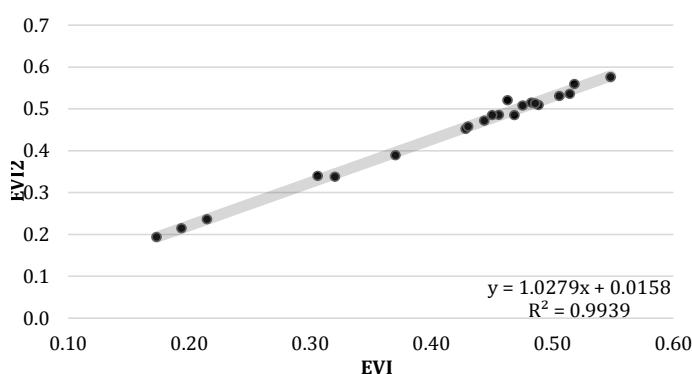
Dessa forma, pode-se dizer que mais interessante para analisar o sequestro florestal de carbono em áreas de floresta seria utilizar os índices EVI e EVI2, e não haveria problema em utilizar qualquer um desses índices (NDVI, EVI e EVI2) para áreas com menor densidade de cobertura vegetal.

Para entender como esses três índices espectrais se relacionam, adotou-se o método de regressão linear entre EVI como variável independente e EVI2 como dependente. Como os dois índices partem dos mesmos princípios, a regressão apresentou um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,993$, indicando uma correlação linear ($r=0,99$) muito forte e positiva entre os índices (Figura IV-9).

De acordo com Jensen (2009), o EVI é um NDVI que possui na sua estrutura um fator de ajuste para o solo e coeficientes que descrevem o uso da banda azul para a correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis. Entretanto, muitos sensores não operam na região espectral do azul. Isso implica que o EVI possui uma limitação de aplicabilidade para alguns sensores que não operam na região do azul e pode ser difícil comparar estatisticamente resultados desse índice com outros índices de vegetação, a partir do sensor Hyperion.

Para Jiang et al. (2008), a alternativa estratégica para o desenvolvimento do EVI2 era decompor a equação EVI original para eliminar a banda azul, assumindo que a reflectância na banda azul pode ser expressa como uma função na banda vermelha. No seu estudo, o EVI2 foi desenvolvido com base em dados do sensor MODIS, e, para outros sensores com diferentes funções de resposta espectral vermelho ou azul, pode ser diferente, por isso a relação entre EVI e EVI2 pode variar ligeiramente de um sensor para outro.

Figura IV-9. Relação entre os índices de vegetação EVI e EVI2.



A semelhança entre EVI e EVI2 foi analisada e validada em multiescalas. As imagens EVI2 mostram padrões muito semelhantes com as imagens EVI com diferenças insignificantes entre os dados de controle. Quando estão presentes elementos como aerossol ou nuvens

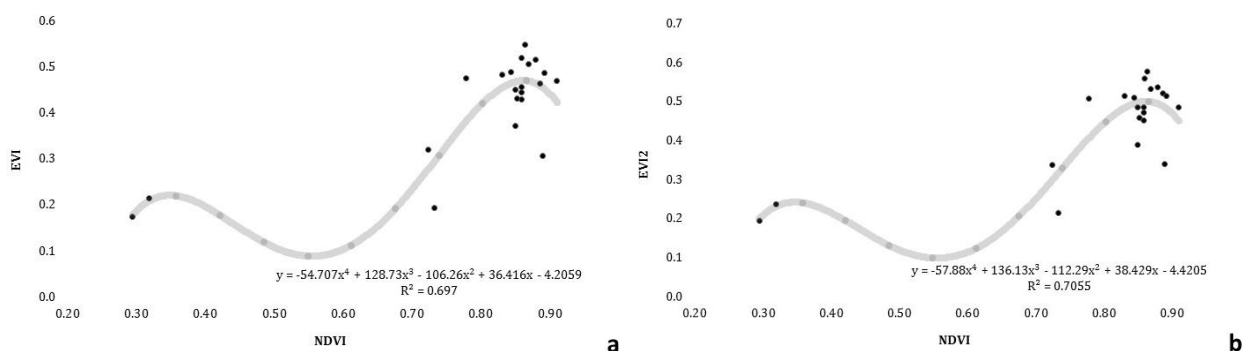
residuais, o EVI é geralmente maior do que EVI2, devido à propriedade de resistência aerossol. A coerência entre o EVI e EVI2 em vários tipos de cobertura do solo demonstrou que sua similaridade foi independente da cobertura da terra (JIANG et al., 2008).

O EVI responde tão bem quanto o EVI2 nos pontos de localização das torres micrometeorológicas. Dessa forma, poderíamos adotar como base para o cálculo de fluxo de CO₂, tanto um índice, quanto o outro. Entretanto, para fins de comparação com outros índices espectrais de vegetação, seria mais interessante utilizar o EVI2.

Ao adotar o NDVI como variável independente e os demais índices (EVI e EVI2) como variáveis dependentes, pode-se dizer que existe correlação positiva de grau forte 0,762, entre os índices NDVI, EVI e EVI2. O coeficiente de determinação com EVI foi de 0,69 e de 0,70 com EVI2 (Figura IV-10).

Pedroza da Silva e Baptista (2013), analisando as variações na modelagem do sequestro florestal de carbono com dados hiperespectrais, observaram também nuances na atividade fotossintética a partir dos índices NDVI, EVI e EVI2. O NDVI apresentou uma relação não linear, sendo que o coeficiente de determinação com EVI foi de 0,53 e com o EVI2, 0,37.

Figura IV-10. Relação linear entre os índices de vegetação NDVI com os índices a) EVI e b) EVI2.



O teste de hipótese sobre a correlação para as análises espectrais foi designado por p , onde se supõe que não existe correlação entre x e y , então $p = 0$. Nessa análise, os testes de significância dos coeficientes de correlação linear foram testados mediante a hipóteses nula $H_0: p=0$ (variáveis não correlacionadas) e alternativa $H_1: p \neq 0$ (variáveis correlacionadas), utilizando a distribuição de Student t , com $n - 2$ graus de liberdade.

Na análise espectral dos dados obtidos, a partir do pixel de localização das torres micrometeorológicas do sensor Hyperion, a correlação entre os índices NDVI e (EVI e EVI2) foi

$r=0,7622$. O teste de hipótese de correlação dos índices apresentou para o EVI ($t=5,132$) e EVI2 ($t=5,144$); $gl=19$; $p < 0,0001$, maior do que o $t_{0,05;19} = 2,093$, indicando que a correlação é estatisticamente significativa para $\alpha=0,05$. Pode-se então dizer que 76% da variação dos valores dos índices EVI e EVI2 estão associadas ao índice NDVI. Por conseguinte, a detecção do sequestro florestal de carbono por meio do índice CO₂flux pode utilizar tanto os índices NDVI, quanto os índices EVI e EVI2.

Análise pontual do sequestro florestal de carbono com CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2

Os resultados fazem referência às relações estatísticas entre as informações obtidas com a aplicação dos índices espectrais (CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2) na imagem Hyperion e as informações de campo da concentração (ppm) e fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂ obtidas pelo método *Eddy Covariance*.

A análise de regressão das variáveis verificadas a partir do coeficiente de determinação ajustou os modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, a uma função não linear com distribuição polinomial. Milone (2004) afirma que a reta ajusta qualquer conjunto de dados. Entretanto, se o ajustamento é insatisfatório, convém tentar as funções não lineares, de grau maior que um.

Além das técnicas clássicas utilizadas para estimar parâmetros e testar hipóteses foi realizada, nessa etapa, uma análise estatística baseada na teoria não paramétrica, uma vez que as exigências das técnicas paramétricas não podem ser satisfeitas, como distribuição normal e homogeneidade de variâncias entre as populações. Além disso, as amostras nesse estudo são relativamente pequenas, devido à insuficiência de dados coincidentes entre as variáveis espectrais e as obtidas em campo. Para Fonseca e Martins (1996), os testes de estatística não paramétricos são aplicáveis para análises de pequenas amostras ($n < 30$).

Para averiguar a normalidade dos dados, utilizou-se o teste estatístico de Shapiro-Wilk (teste W) (Tabela IV-5).

Tabela IV-5. Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk	CO ₂ flux	CO ₂ fluxEVI	CO ₂ fluxEVI2	1 hora			2 horas		
				Fluxo	Perfis de CO ₂	Medição de CO ₂ no topo das Torres	Fluxo	Perfis de CO ₂	Medição de CO ₂ no topo das Torres
N	21	21	21	15	21	21	15	21	21
W_{cal}	0.5431	0.8696	0.8659	0.9651	0.8319	0.9567	0.9562	0.8052	0.8052
p	0.0062	0.0100	0.0099	0.7414	0.0095	0.4639	0.5998	0.0092	0.0092

Hipóteses:

- H_0 : as variáveis analisadas não são normalmente distribuídas
- H_1 : as variáveis analisadas apresentam normalidade na sua distribuição
- Nível de decisão: $\alpha=0,05$

Pela regra de decisão, o teste de normalidade para a maioria das variáveis analisadas, o p-valor calculado ao nível de significância de 5% não apresenta normalidade na sua distribuição, uma vez que a maioria das variáveis apresentaram o $W_{cal} < W_{(0,05;21)} = 0,908$. As variáveis “medição de CO₂ no topo das torres com observação de 1 hora”, $W_{cal} 0.9567 > W_{(0,05;21)} = 0.908$ e os dados de fluxo $W_{cal} > W_{(0,05;15)} = 0.881$ são normalmente distribuídos na população.

Os testes não paramétricos são mais apropriados quando não se conhece a distribuição dos dados na população. Tornam-se úteis quando essa distribuição é assimétrica e não se deseja realizar uma transformação dos dados, quando existe heterogeneidade nas variâncias (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

O modelo foi alimentado inicialmente, na sua estrutura original CO₂flux, a partir da integração do NDVI e do sPRI. Em seguida, foi reestruturado para formar o CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, para se correlacionarem com dados de campo de concentração e fluxo de CO₂, dos sítios experimentais k34, K67, K83, FNS e SIN, localizados na Amazônica brasileira.

O sequestro florestal de carbono foi analisado pelo índice CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, além do fator de tendência temporal de flutuação dos dados entre 1 e 2 horas. Utilizou-se, inicialmente, a leitura de 1 pixel para extração dos dados, correspondente a localização das torres micrometeorológicas com: 1) médias de perfis de concentração de CO₂ ao longo da torre; 2) concentração de CO₂ no topo das torres e 3) fluxo de CO₂ com os índices de sequestro de carbono.

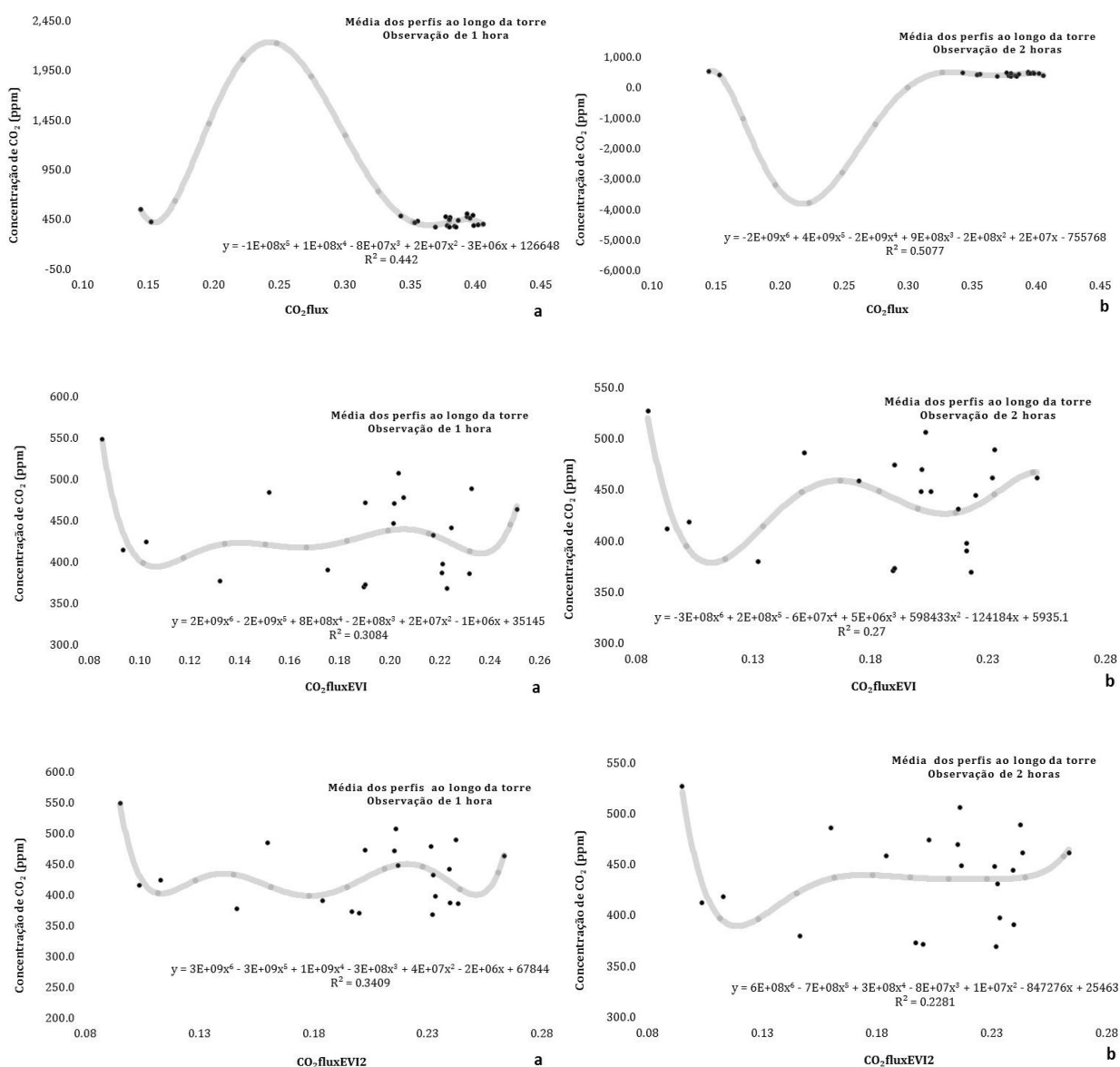
1) Médias de perfis de concentração de CO₂ ao longo das torres

O perfil de concentração de CO₂ foi verificado pelos instrumentos instalados em diferentes alturas (Tabela III-3), ao longo das torres (k34, k83, k67 e SIN) e apenas uma medida na torre FNS. Para obter a informação necessária para a análise, as médias dos dados foram extraídas e associados às medidas espectrais na data e horário da passagem do sensor Hyperion.

Em relação aos dados de CO₂flux e concentração de CO₂ (ppm) ao longo das torres, a figura IV-11 mostra que o coeficiente de determinação para as observações, a cada 1 hora ficou em 0,442. Enquanto que, para as observações a cada 2 horas, o coeficiente foi de 0,5077.

Quanto aos modelos, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, o ajustamento da curva apresentou coeficientes de determinação de 0,3409 e 0,3084, para as observações a cada 1 hora e de 0,2700 e 0,2281, para as observações a cada 2 horas respectivamente.

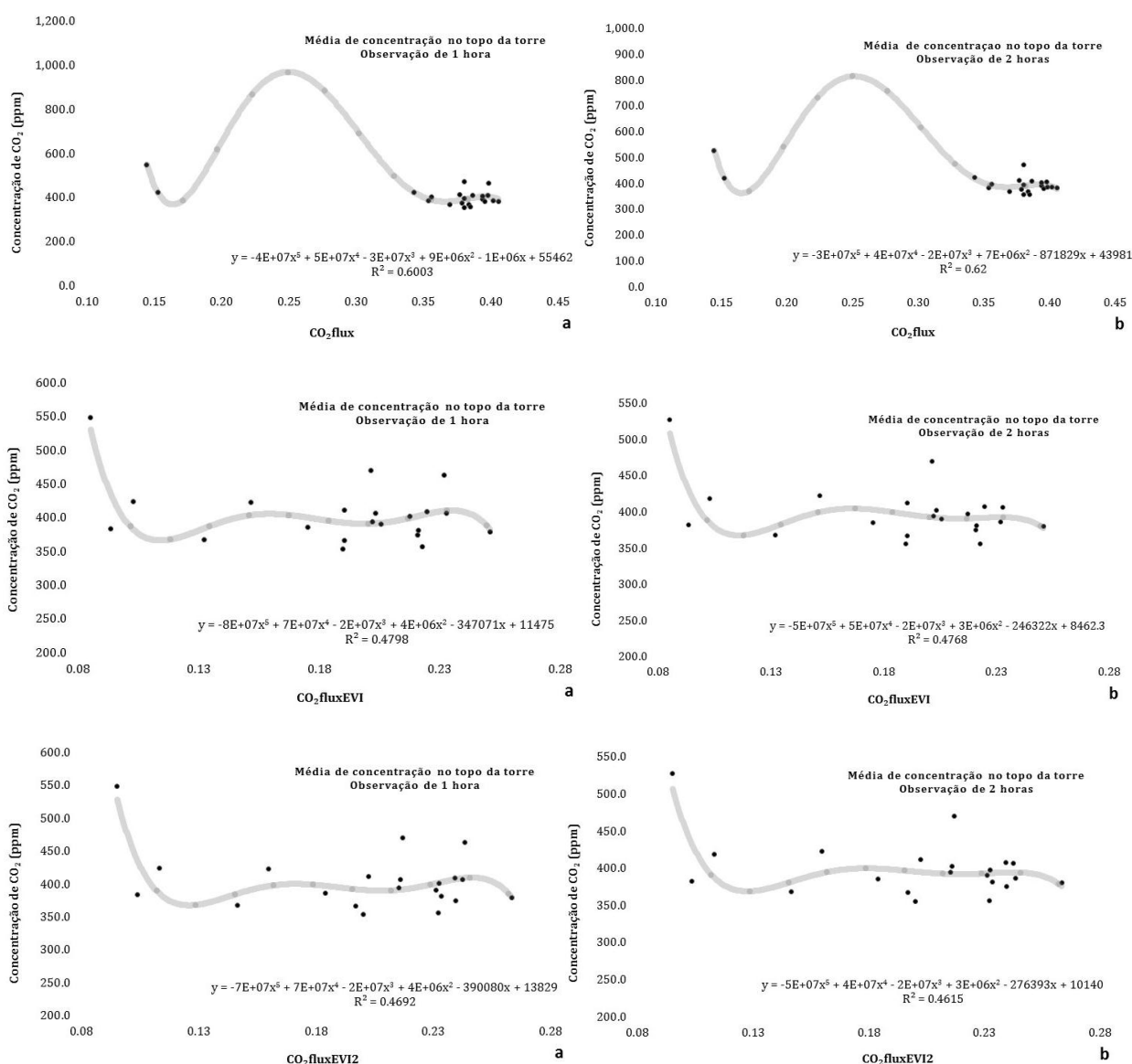
Figura IV-11. Ajustes dos modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, com a concentração (ppm) ao longo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.



2) Concentração de CO₂ no topo das torres

De acordo com os resultados, pode-se verificar que o CO₂flux se relaciona melhor com a concentração de CO₂ no topo das torres, onde é verificada os melhores ajustamentos da curva com os coeficientes de determinação de 0,6003 e 0,62, baseado nas observações a cada uma hora e a cada duas, respectivamente para o modelo CO₂flux. Os resultados entre os modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 são muito similares, enquanto que o CO₂fluxEVI apresentou coeficientes de determinação de 0,4798 e 0,4768, baseados nas observações a cada uma hora e a cada duas, respectivamente. O CO₂fluxEVI2 apresentou coeficientes de determinação de 0,4692 e 0,4615 para observações a cada 1 e 2 horas (Figura IV-12).

Figura IV-12. Ajustes do CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com a concentração (ppm) no topo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.

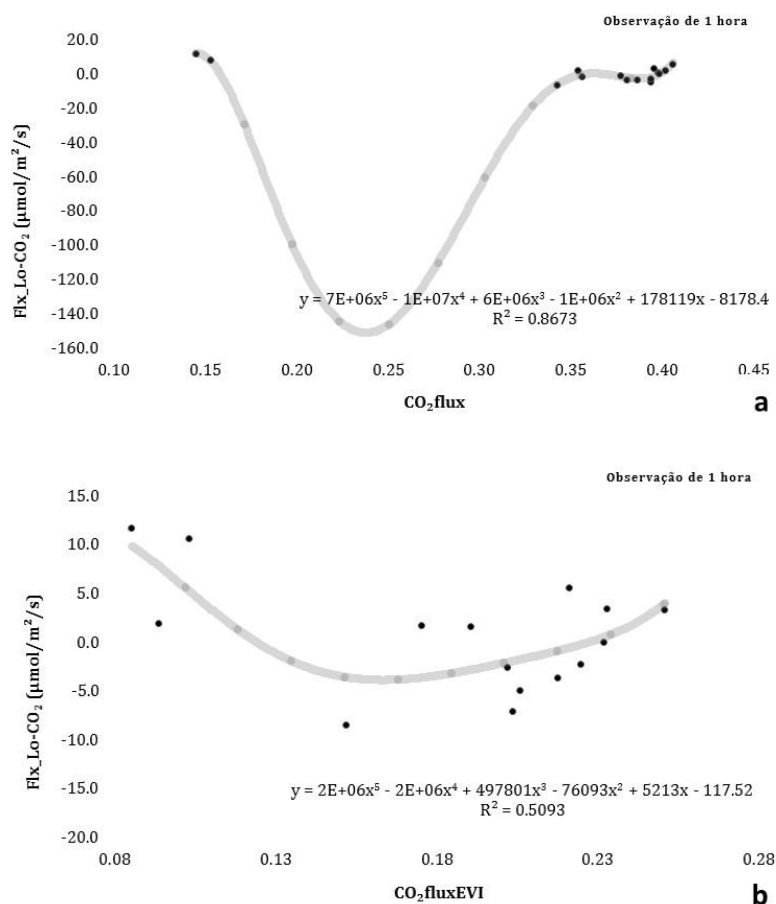


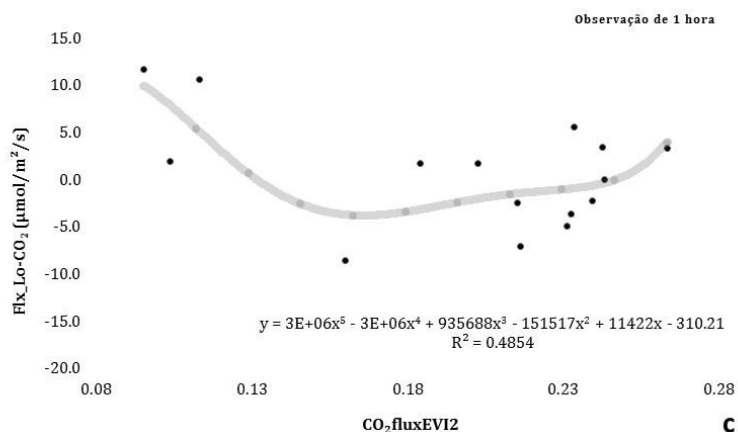
3) Fluxo de CO₂ com os índices de sequestro de carbono

O ajuste entre os modelos e os dados de fluxos ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) foram apresentados para dois grupos de análise. Foram testados os modelos com a média de observação a cada 1 hora (Figura IV-13) e depois com a média de observações a cada 2 horas (Figura IV-14).

Na figura IV-13, os resultados da regressão entre variáveis e dados de fluxo observado a cada 1 hora mostram que o melhor ajustamento da curva acontece com o modelo CO₂flux ($R^2=0,7887$). Enquanto os modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 apresentaram coeficientes de determinação similares de 0,5093 e 0,4854, respectivamente.

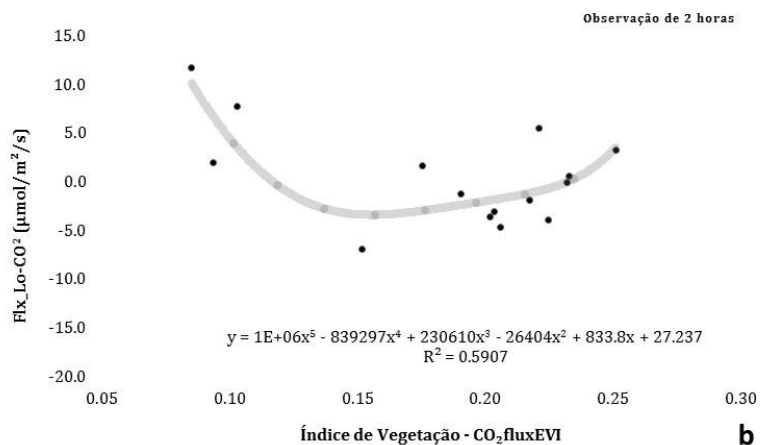
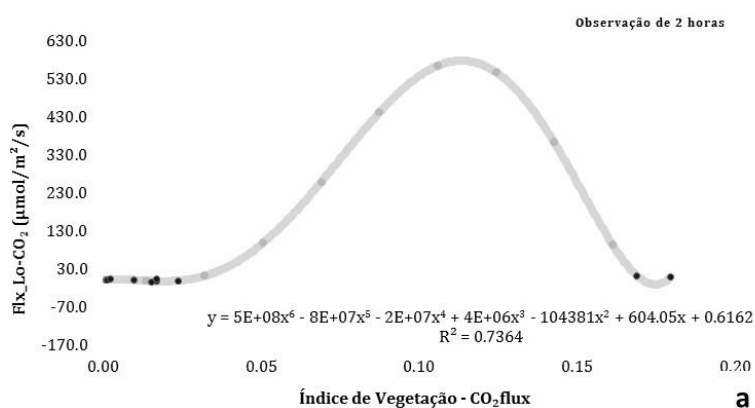
Figura IV-13. Ajustes do CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 1 hora.

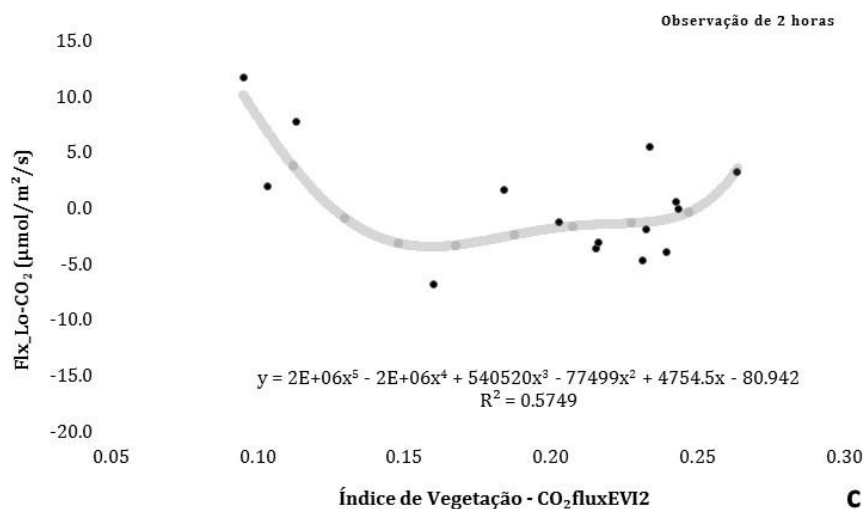




Na figura IV-14, a modelagem para observações obtidas com médias a cada 2 horas, verifica-se que o CO₂flux apresenta ajustamentos melhores ($R^2=0,8673$), com relação aos outros dois modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, os coeficientes de determinação são dados da seguinte maneira, respectivamente, $R^2=0,5907$ e $R^2=0,5749$.

Figura IV-14. Ajustes do CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 2 horas.





Nessa primeira análise que avalia qual índice descreve melhor o sequestro florestal, tomando as áreas que correspondem às coordenadas geográficas das torres micrometeorológicas, com leitura de 1 pixel na imagem Hyperion, os índices CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 são explicados em uma associação não linear com os dados de concentração e fluxo de CO₂ obtidos nas torres.

A análise para avaliar a correlação entre as variáveis medidas foi realizada dos coeficientes de correlação de Spearman para dados não paramétricos. Também se realizou a correlação canônica, partindo do pressuposto de que existem dois conjuntos de dados multivariados para confirmar a correlação entre as variáveis analisadas nesse estudo.

Na tabela IV-6, é apresentado o coeficiente de Spearman para dados não paramétricos. Os resultados apontam para correlações fracas entre as variáveis. Esse dado indica que as associações são do tipo não lineares, indicando correlações negativas.

Tabela IV-6. Correlação de Spearman (r_s).

Correlação de Spearman (r_s)		Perfis de CO ₂ (1 h)	Perfis de CO ₂ (2 h)	CO ₂ no Topo das Torres (1 h)	CO ₂ no Topo das Torres (2 h)	Fluxo de CO ₂ (1 h)	Fluxo de CO ₂ (2 h)
Número de pares		21	21	21	21	21	21
CO ₂ flux	r_s	-0.1092	0.0539	-0.2183	-0.3210	-0.0322	-0.0283
	t	-0.4787	0.2354	-0.9752	-1.4773	-0.1405	-0.1232
	p	0.6376	0.8164	0.3417	0.1559	0.8898	0.9032
CO ₂ fluxEVI	r_s	-0.0351	0.0124	-0.1340	-0.2185	-0.1819	-0.2076
	t	-0.1532	0.0539	-0.5893	-0.9762	-0.8064	-0.9249
	p	0.8799	0.9576	0.5626	0.3412	0.4300	0.3665
CO ₂ fluxEVI2	r_s	-0.0260	0.0221	-0.0903	-0.1832	-0.1587	-0.1870
	t	-0.1133	0.0963	-0.3953	-0.8125	-0.7008	-0.8297
	p	0.9110	0.9243	0.6970	0.4266	0.4919	0.4170

A maior correlação (r_s) verificada foi entre as variáveis CO₂flux e o CO₂ medidas no topo das torres de $r=-0,3210$, com valor de t_{cal} igual a $-1,477$ ($N=21$; $p=0,1559$), menor do que o $t_{0,05;19} = 2,093$, indicando que não há correlação significativa para $\alpha=0,05$, uma vez que esse tipo de correlação é realizado entre postos e não entre os valores efetivamente medidos na imagem ou com dados de campo.

Na tabela IV-7 são apresentadas as correlações canônicas. Na primeira correlação canônica, que é a correlação entre o primeiro par de variáveis canônicas, é (R Canônico = 0,8350) representando a melhor correlação possível entre qualquer combinação linear das variáveis espectrais (Grupo Y) com as variáveis de medição de CO₂ direta na torre (Grupo X). A estatística R Canônico expressa a magnitude do relacionamento entre os dois conjuntos de variáveis. Portanto é confirmada a associação entre os conjuntos de variáveis X e Y pelo Qui Quadrado (χ^2) igual a 25,1642, com $gl=18$, e o correspondente p-valor (p) igual a 0,1205, indica que os dados tratados em conjuntos diferenciados não são significativos para a linearidade, pois são dados que se ajustam aos modelos não lineares.

Tabela IV-7. Resultados da Correlação Canônica.

R CANÔNICO	0.8350				
QUI QUADRADO (χ^2)	25.1642				
GRAUS DE LIBERDADE	18				
P-VALOR (p)	0.1205				
VARIÁVEL CANÔNICA	Autovalores (R2)	Correlações canônicas	Qui-quadrado (χ^2)	GL	p-valor (p)
CO₂FLUX	0.6973	0.8350	25.1642	18	0.1205
CO₂FLUXEVI	0.2400	0.4899	6.0446	10	0.8115
CO₂FLUXEVI2	0.0982	0.3134	1.6536	4	0.7991

Entretanto, quando se analisa cada associação pela matriz de correlação canônica (Tabela IV-8), verifica-se que existem 6 (seis) associações que são estatisticamente significativas, ou seja, a associação entre CO₂flux pode ser realizada entre as variáveis (CO₂ no Topo das Torres (1 h), CO₂ no Topo das Torres (2 h), Fluxo de CO₂ (1 h) e Fluxo de CO₂ (2 h)) e as associações entre os modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 podem ser realizadas apenas com o Fluxo de CO₂ (2 h).

Tabela IV-8. Matriz de Correlação entre os dois grupos (variáveis espectrais e medição direta).

<i>Correlação</i>	CO₂flux		CO₂fluxEVI		CO₂fluxEVI2	
Perfis de CO₂ (1 h)	-0.342	ns*	-0.151	ns	-0.134	ns
Perfis de CO₂ (2 h)	-0.220	ns	-0.059	ns	-0.057	ns
CO₂ no Topo das Torres (1 h)	-0.599 ($p < 0.01$)		-0.343	ns	-0.338	ns
CO₂ no Topo das Torres (2 h)	-0.642 ($p < 0.01$)		-0.417	ns	-0.407	ns
Fluxo de CO₂ (1 h)	-0.637 ($p < 0.01$)		-0.400	ns	-0.414	ns
Fluxo de CO₂ (2 h)	-0.660 ($p < 0.01$)		-0.443 ($p < 0.01$)		-0.456 ($p < 0.01$)	

*Onde ns corresponde a não significativo.

Na relação entre modelagem de sequestro florestal de carbono e dados de concentração de CO₂ (ppm), os resultados mostraram que as medidas de CO₂ no topo das torres são mais eficientes para a associação com medidas espectrais, do que as medições de CO₂ realizadas ao longo das torres.

Pela matriz de correlações, o modelo ajustado indica que 64% da variação observada de CO₂flux, 41% de CO₂fluxEVI e 40% de CO₂fluxEVI2 são explicados pela quantidade de CO₂ absorvida pela vegetação no momento da passagem do sensor Hyperion, padronizados com média de intervalos a cada duas horas.

Pode-se afirmar que a modelagem de sequestro florestal de carbono tem melhores ajustes com a associação dos dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹), com observação a cada duas horas. Indicando que as variações de 66% de CO₂flux, 44% de CO₂fluxEVI e 45% de CO₂fluxEVI são explicados pela intensidade de assimilação e emissão de CO₂ atmosférico, no momento da passagem do sensor, onde se encontravam as cinco torres micrometeorológicas.

As correlações canônicas descritas são negativas, de grau forte entre as variáveis CO₂flux e as medidas de CO₂ nas torres micrometeorológicas. Assim, quanto maior é a atividade fotossintética medida pelo CO₂flux, menor é a concentração (ppm), e a intensidade de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂, tende a ser negativa na camada atmosférica próxima das torres, na hora da passagem do satélite EO-1.

Verifica-se, nessa etapa, que as análises espectrais de CO₂flux e as medições diretas de concentração de CO₂ no topo das torres micrometeorológicas e também as medições de fluxo estão bem correlacionadas em uma associação negativa.

Visando testar a similaridade estatística entre os modelos de sequestro florestal de carbono, aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney ou Teste *U*.

Para o teste *U* foram determinadas que:

- H₀: não há diferença entre as informações obtidas a partir dos índices espectrais na imagem Hyperion e nas informações de campo de concentração (ppm) e fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂ medido nas torres micrometeorológicas.
- H₁: há diferença entre as informações obtidas a partir dos índices espectrais na imagem Hyperion e nas informações de campo de concentração (ppm) e fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂ medido nas torres micrometeorológicas.

Verifica-se, na tabela IV-9, que todos os valores de t_{cal} são menores que o $t_{0,05;\infty} = 1,96$ ao nível de significância para $\alpha=0,05$, concluindo que não há diferença entre as informações obtidas a partir dos índices espectrais na imagem Hyperion e nas informações de campo de concentração (ppm) e fluxo ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) de CO_2 medido nas torres micrometeorológicas. Portanto, existe similaridade entre as variáveis analisadas.

Tabela IV-9. Teste U de similaridade.

Teste U	Perfis de CO_2 (1 h)	Perfis de CO_2 (2 h)	CO_2 no Topo das Torres (1 h)	CO_2 no Topo das Torres (2 h)	Fluxo de CO_2 (1 h)	Fluxo de CO_2 (2 h)	
CO_2flux	U	13.5	0	0	168	147	
	U'	5.2072	5.5468	5.5468	5.5468	1.3207	1.8489
	t	-2.9653	-3.1587	-3.1587	-3.1587	0.1941	-0.1941
	p	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.1866	0.0645
$\text{CO}_2\text{fluxEVI}$	U	0	0	0	168	147	
	U'	5.5468	5.5468	5.5468	5.5468	1.3207	1.8489
	t	-3.1587	-3.1587	-3.1587	-3.1587	0.1941	-0.1941
	p	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.1866	0.0645
$\text{CO}_2\text{fluxEVI2}$	U	0	0	0	168	147	
	U'	5.5468	5.5468	5.5468	5.5468	1.3207	1.8489
	t	-3.1587	-3.1587	-3.1587	-3.1587	0.1941	-0.1941
	p	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.1866	0.0645

Da mesma forma, com os resultados encontrados nesse estudo para dados do sensor Hyperion, foram satisfatórios também de os resultados de Harris e Dash (2010), que apresentaram correlações e similaridades estatísticas entre dados espectrais do sensor MERIS e MODIS em áreas de florestas. Em culturas agrícolas, também vêm sendo estudadas as correlações entre estoque e sequestro de carbono, que apresentaram potencialidade com uso de imagens Quickbird e Landsat (COLTRI et al., 2009).

A modelagem pontual de sequestro florestal de carbono para as coordenadas geográficas onde estão localizadas as torres micrometeorológicas em sítios que abrangem áreas naturais e antrópicas na Amazônia Brasileira, pode ser realizada a partir do índice CO_2flux , apesar do problema de saturação do NDVI. Tanto com os dados de concentração de CO_2 (ppm) medidos no topo das torres, quanto com os dados de fluxo ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) possuem similaridades e são estatisticamente significativos com os dados do sensor Hyperion.

Análise espacial (*footprint*) do sequestro florestal de carbono com CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2

Devido a variabilidade ambiental do estudo as variáveis foram analisadas também pela sua área de influência pela direção predominante do vento. Para Zhao et al., (2014), a determinação do *footprint* é necessário para a interpretação dos resultados, especialmente quando envolve diferentes paisagens.

De acordo com Leal (2000) nos estudos que envolvem a medição de fluxos de superfície de CO₂ é importante conhecer a área monitorada pelo sistema, e uma das variáveis que possibilitam isso é a que determina a direção dos ventos.

A partir de mensurações da direção, velocidade do vento e o percurso do fluxo foi possível calcular a área de influência (*footprint*) fonte/sumidouro do CO₂ para cada torre estudada (Tabela IV-10).

Tabela IV-10. Área (ha) do *footprint* das torres micrometeorológicas.

Nome e Ambientes encontrados nas Torres	Número de Pixels	Distâncias Máximas (m)	Área de Influência (ha)
Torre K34 (Floresta Primária)	2423,4	2300	207,06
Torre K67 (Floresta Primária)	477,4	920	42,95
Torre K83 (Exploração Seletiva de Madeira)	305,5	910	26,73
Torre FNS (Pastagem)	157,5	650	14,15

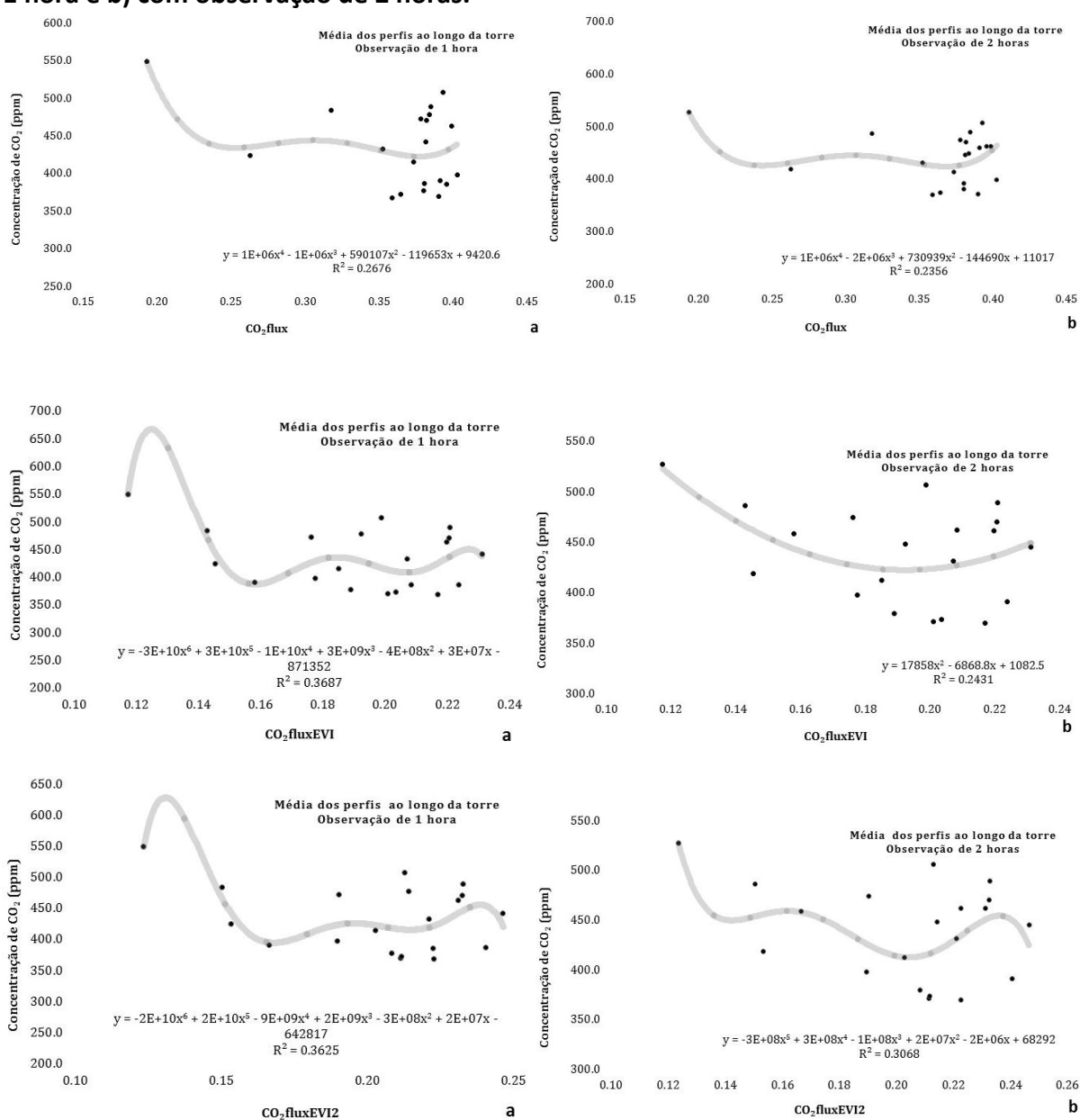
O *footprint* das torres é influenciado pelo ambiente e principalmente pelo tipo de relevo, onde as torres micrometeorológicas se encontram. Os dados de *footprint* para torre K34, corroboram com os resultados analisados por Moura et al., (2007), que encontrou o *footprint* da mesma torre em condições estáveis, distâncias maiores que 2 km, sofrendo claramente contribuições das regiões de baixios.

A análise espacial do sequestro florestal de carbono foi verificada a partir do *footprint* das torres para: 1) médias de perfis de concentração de CO₂ ao longo da torre; 2) concentração de CO₂ no topo das torres e 3) fluxo de CO₂ com os índices de sequestro de carbono.

1) Médias de perfis de concentração de CO₂ ao longo da torre - Footprint

A figura IV-15 mostra que a associação entre as variáveis analisadas a partir do *footprint* com a concentração de CO₂ (ppm) ao longo das torres, apresentam valores baixos. Para 1 hora, os coeficientes de determinação foram ajustados com 0,267 para CO₂flux, 0,368 para CO₂fluxEVI e 0,362 para CO₂fluxEVI2 e para duas horas de observações, os coeficientes de determinação apresentaram 0,235, 0,243 e 0,306 para os modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, respectivamente.

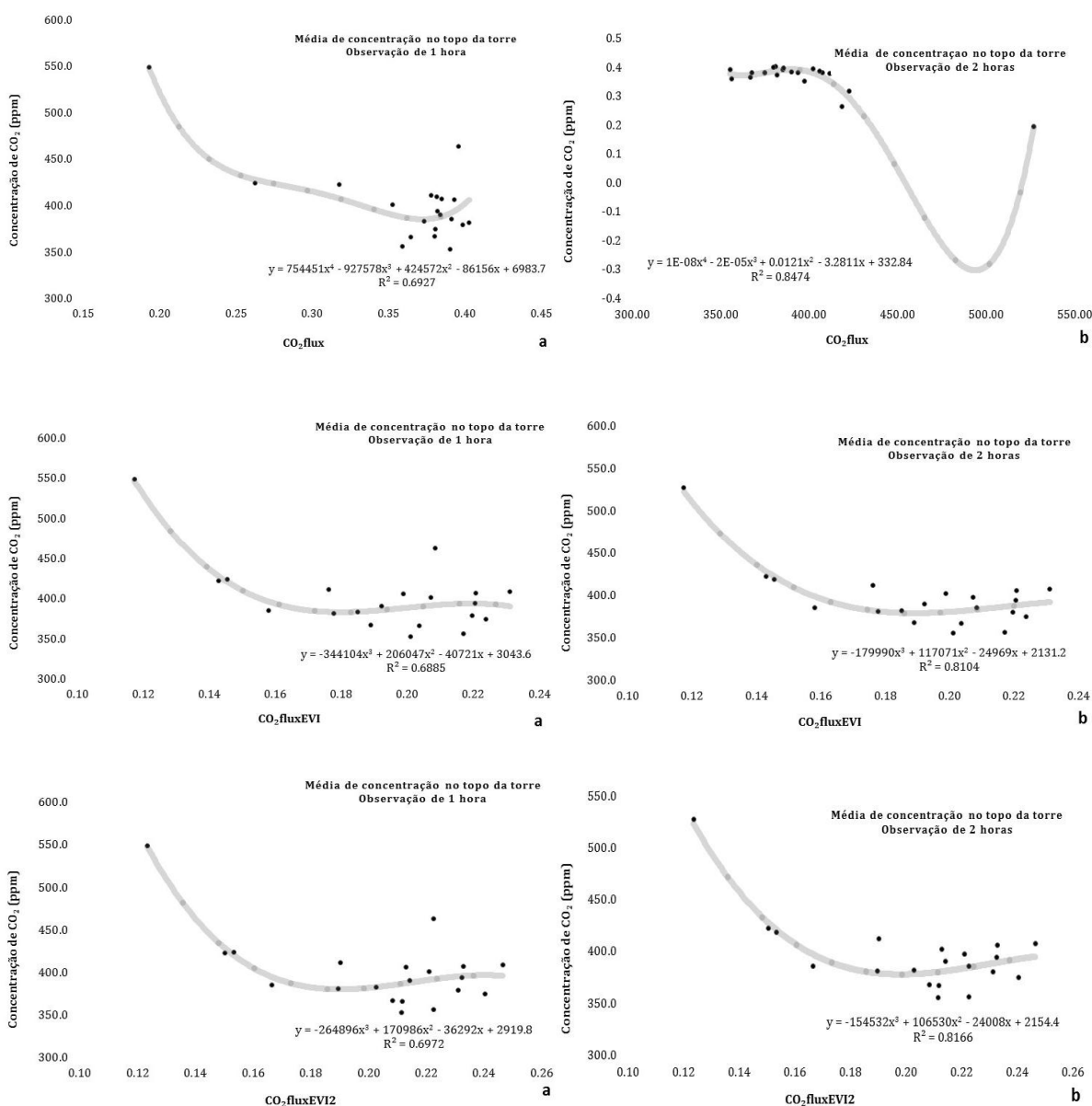
Figura IV-15. Ajustes do *footprint* aos modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, com a concentração (ppm) ao longo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.



2) Concentração de CO₂ no topo das torres

Verifica-se, na figura IV-16, que o modelo CO₂flux a partir do *footprint* apresentou melhores ajustamentos não lineares com os coeficientes de determinação de 0,69 e 0,84 para observações a cada 1 e 2 horas, respectivamente. Os resultados entre os modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 apresentaram ajustamentos não lineares com coeficientes de determinação de 0,688 e 0,697 para as observações a cada 1 hora. Enquanto que, para as observações a cada 2 horas, o CO₂fluxEVI apresentou R²=0,810 e o CO₂fluxEVI2 com R²=0,816.

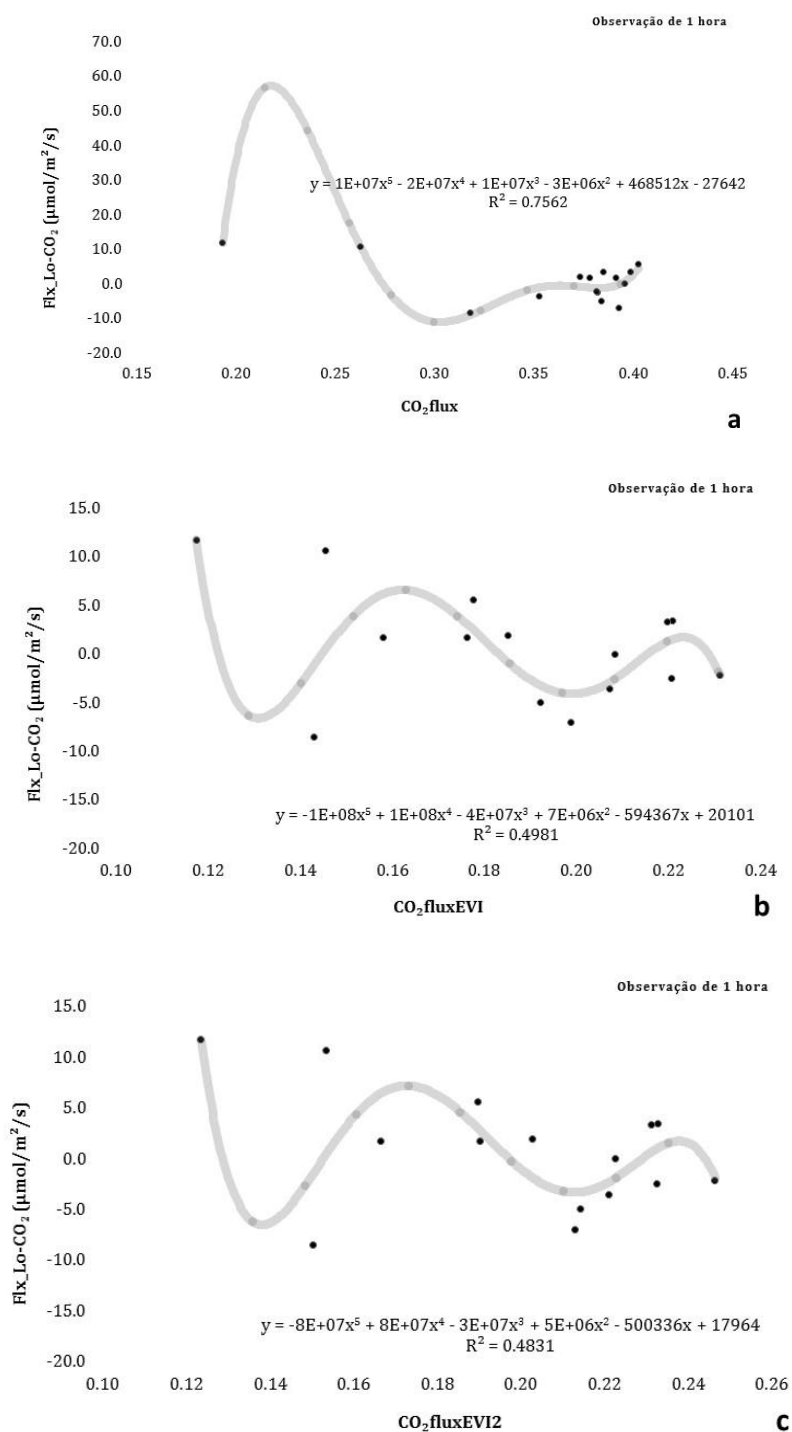
Figura IV-16. Ajustes do *footprint* aos modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com a concentração (ppm) no topo das torres: a) com relação à média de perfis com observação de 1 hora e b) com observação de 2 horas.



3) Fluxo de CO₂ com os índices de sequestro de carbono

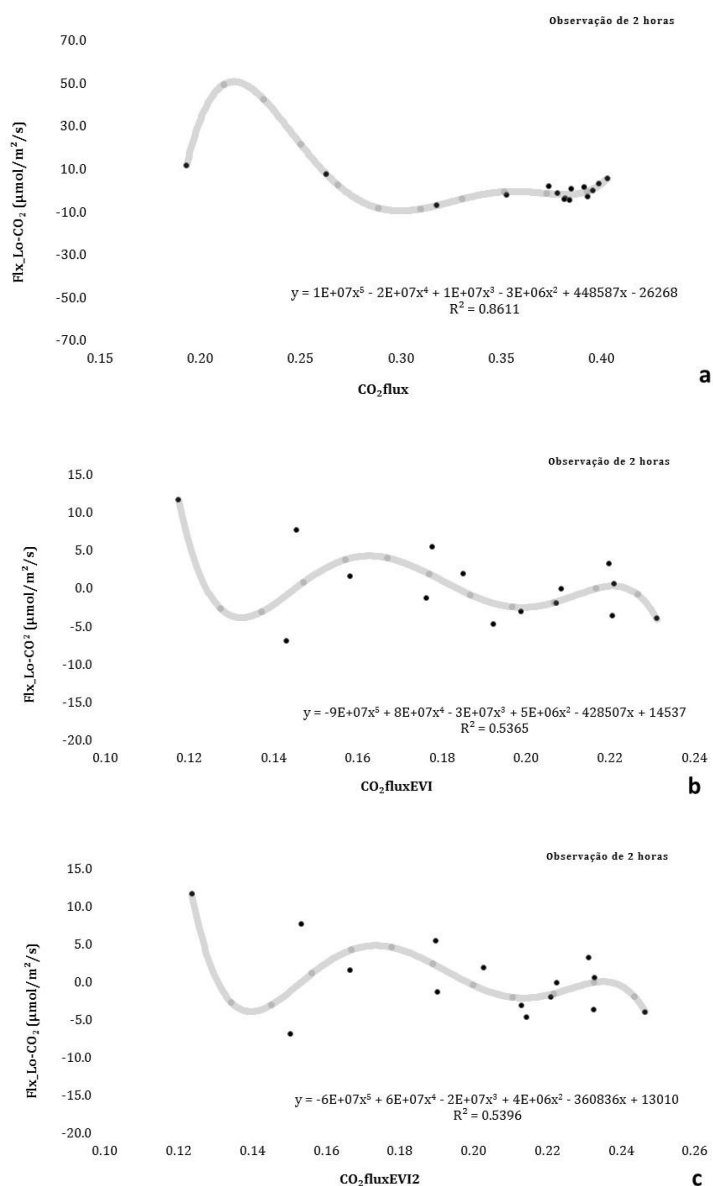
O ajuste entre os modelos e os dados de fluxos ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), a partir do *footprint* para as observações a cada 1 hora (Figura IV-17), apresentaram coeficientes de $R^2=0,756$ para o CO₂flux, $R^2=0,498$ para o CO₂fluxEVI e $R^2=0,483$ para o CO₂fluxEVI2.

Figura IV-17. Ajustes do *footprint* aos modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 1 hora.



Na figura IV-18, na modelagem para observações obtidas a partir do *footprint* com médias a cada 2 horas, verifica-se que o CO₂flux apresenta ajustamentos melhores ($R^2=0,861$), com relação aos outros dois modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 que apresentaram coeficientes de determinação de 0,536 e 0,539, respectivamente.

Figura IV-18. Ajustes do *footprint* aos modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 2 horas.



A análise para avaliar a correlação entre as variáveis medidas a partir do *footprint* foi realizada com coeficientes de correlação de Spearman e a correlação canônica.

Na tabela IV-11, é apresentado o coeficiente de Spearman para dados não paramétricos do *footprint*. Os resultados apontam para correlações fracas entre as variáveis.

Esses dados indicam que as associações são do tipo não lineares, indicando correlações negativas.

Tabela IV-11. Correlação de Spearman (r_s) - *Footprint*.

Correlação de Spearman (r_s)		Perfis de CO ₂ (1 h)	Perfis de CO ₂ (2 h)	CO ₂ no Topo das Torres (1 h)	CO ₂ no Topo das Torres (2 h)	Fluxo de CO ₂ (1 h)	Fluxo de CO ₂ (2 h)
Número de pares		20	20	20	20	20	20
CO ₂ flux	r_s	-0.0737	-0.2377	0.0760	-0.3543	-0.0243	0.0030
	t	-0.3136	-1.0383	0.3232	-1.6073	-0.1029	0.0129
	p	0.7574	0.3129	0.7502	0.1253	0.9192	0.9899
CO ₂ fluxEVI	r_s	-0.0737	-0.3061	-0.1903	-0.3513	-0.2789	-0.2895
	t	-0.3136	-1.3643	-0.8224	-1.5917	-1.2322	-1.2832
	p	0.7574	0.1892	0.4216	0.1288	0.2337	0.2156
CO ₂ fluxEVI2	r_s	-0.1031	-0.2318	-0.1076	-0.2769	-0.3199	-0.3427
	t	-0.4397	-1.0108	-0.4592	-1.2226	-1.4327	-1.5476
	p	0.6654	0.3255	0.6516	0.2372	0.1690	0.1390

A maior correlação (r_s) do *footprint* verificada foi entre as variáveis CO₂flux e CO₂ medido no topo das torres de $r=-0,3543$, com valor de t_{cal} igual a $-1,607$ ($N=20$; $p =0,1253$), menor do que o $t_{0,05;18} = 2,101$, indicando que não há correlação significativa para $\alpha=0,05$. As demais correlações também são todas não significativas, isso pode ser explicado pelo tipo de correlação que é realizado, pois trata-se de correlações entre postos e não entre os valores efetivamente medidos na imagem ou com dados de campo.

Na tabela IV-12, são apresentadas as correlações canônicas. A primeira correlação canônica (R Canônico= $0,9372$) representa a melhor correlação possível entre qualquer combinação linear das variáveis espectrais (Grupo Y) com as variáveis de medição de CO₂ direta na torre (Grupo X). Portanto é confirmada a associação entre os conjuntos de variáveis X e Y pelo Qui-Quadrado (χ^2) igual a $40,9281$ com $gl=18$, e o correspondente p-valor (p) igual a $0,0016$, que é muito significativo estatisticamente.

Tabela IV-12. Resultados da Correlação Canônica - Footprint.

R CANÔNICO	0.9372				
QUI-QUADRADO (χ^2)	40.9281				
GRAUS DE LIBERDADE	18				
P-VALOR (p)	0.0016				
VARIÁVEL CANÔNICA	Autovalores (R2)	Correlações canônicas	Qui-quadrado (χ^2)	GL	p-valor (p)
CO₂FLUX	0.9372	0.8784	40.9281	18	0.0016
CO₂FLUXEVI	0.6676	0.4456	9.3254	10	0.5015
CO₂FLUXEVI2	0.1768	0.0313	0.4765	4	0.9757

A matriz de correlação apresenta as principais associações lineares entre as variáveis que compõem os dois grupos variáveis espectrais e medição direta, onde se constata que há dez correlações X e Y que são significativas (Tabela IV-13).

Tabela IV-13. Matriz de Correlação entre os dois grupos (variáveis espectrais e medição direta) - Footprint.

Correlação	CO₂flux		CO₂fluxEVI		CO₂fluxEVI2	
Perfis de CO₂ (1 h)	-0.421	ns*	-0.317	ns	-0.304	ns
Perfis de CO₂ (2 h)	-0.719	($p < 0.01$)	-0.564	($p < 0.01$)	-0.559	($p < 0.05$)
CO₂ no Topo das Torres (1 h)	-0.296	ns	-0.320	ns	-0.313	ns
CO₂ no Topo das Torrse (2 h)	-0.812	($p < 0.01$)	-0.650	($p < 0.01$)	-0.649	($p < 0.01$)
Fluxo de CO₂ (1 h)	-0.517	($p < 0.05$)	-0.406	ns	-0.427	ns
Fluxo de CO₂ (2 h)	-0.561	($p < 0.05$)	-0.482	($p < 0.05$)	-0.501	($p < 0.05$)

*Onde ns corresponde a não significativo

Como examinado para a análise pontual, as relações a partir do *footprint* da área de concentração de CO₂ (ppm) com os modelos espectrais se relacionam melhor com as medidas no topo das torres. Entretanto, as análises indicaram que para o CO₂flux essa relação pode ser linearmente associada. Assim, o CO₂flux indica que 81% da variação observada de CO₂flux, são explicados pela quantidade de CO₂ absorvido pela vegetação no momento da passagem do

sensor Hyperion. E, em uma relação não linear, os modelos indicam que essa variação é explicada por 65% de CO₂fluxEVI e 64% de CO₂fluxEVI2.

A modelagem de sequestro florestal de carbono a partir do *footprint* de ajustes com a associação dos dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) apresentou relações não lineares. Indicando que a variação de 56% de CO₂flux, 48% de CO₂fluxEVI e 50% de CO₂fluxEVI são explicados pela intensidade de assimilação e emissão de CO₂ atmosférico, no momento da passagem do sensor, com observações a cada 2 horas.

Da mesma forma que, para a análise pontual, o teste de similaridade estatística entre os modelos de sequestro florestal de carbono, aplicou-se o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney ou Teste *U*.

Verifica-se, na tabela IV-14, que todos os valores de t_{cal} são menores que o $t_{0,05;\infty} = 1,96$, concluindo que não há diferença entre as informações obtidas a partir do *footprint* dos índices espectrais na imagem Hyperion e nas informações de campo de concentração (ppm) e fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂ medido nas torres micrometeorológicas. Portanto, existe similaridade entre as variáveis analisadas.

Tabela IV-14. Teste U de similaridade - *Footprint*.

Teste U		Perfis de CO ₂ (1 h)	Perfis de CO ₂ (2 h)	CO ₂ no Topo da Torre (1 h)	CO ₂ no Topo da Torre (2 h)	Fluxo de CO ₂ (1 h)	Fluxo de CO ₂ (2 h)
CO ₂ flux	U	0	0	0	0	160	140
	U'	5.4100	5.4100	5.4100	5.4100	1.0820	1.6230
	t	-3.1587	-3.1587	-3.1587	-3.1587	0.0462	-0.3234
	<i>p</i>	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.2793	0.1046
CO ₂ fluxEVI	U	0	0	0	0	160	140
	U'	5.4100	5.4100	5.4100	5.4100	1.0820	1.6230
	t	-3.1587	-3.1587	-3.1587	-3.1587	0.0462	-0.3234
	<i>p</i>	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.2793	0.1046
CO ₂ fluxEVI2	U	0	0	0	0	160	140
	U'	5.4100	5.4100	5.4100	5.4100	1.0820	1.6230
	t	-3.1587	-3.1587	-3.1587	-3.1587	0.0462	-0.3234
	<i>p</i>	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.2793	0.1046

A modelagem espacial do sequestro florestal de carbono para o *footprint* das torres pode ser realizada a partir dos modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2. Tanto com os dados de concentração de CO₂ medidos ao longo e no topo das torres para as observações a cada

duas horas, quanto com os dados de fluxo para duas horas, pois possuem significância estatística, e todas as variáveis possuem similaridades com os dados do sensor Hyperion.

Os melhores ajustes com o *footprint* foram com as variáveis CO₂flux com medidas de CO₂ no topo das torres (ppm), pois apresentaram correlação forte, em uma relação negativa com o coeficiente de determinação de 0,66 e 0,81 para observações a cada 2 horas.

A modelagem com ajuste do *footprint* para os dados de fluxo de CO₂ (mol.m⁻².s⁻¹) apresentou relação não linear para observações obtidas com médias a cada 2 horas, o CO₂flux apresentou ajustamento melhor de ($R^2=0,86$) e correlação negativa moderada de -0,56.

O CO₂flux a partir do *footprint* possui melhor correlação e ajustamento linear com as medidas de concentração de CO₂ (ppm) no topo das torres a cada 2 horas de observação. Assim, como é possível utilizar as medidas de fluxo de CO₂ que apresentaram correlação moderada e ajustamento não linear. Dessa forma, a análise para o *footprint* da área de influência apresentou melhores resultados com a associação entre os dados espectrais e os dados medidos nas torres a partir do CO₂flux.

Resultados similares de CO₂flux foram encontrados por Rahman et al. (2000; 2001), entretanto os autores apresentam uma relação linear, com um valor de R^2 de 0,78, entre os dados de CO₂flux e o fluxo de CO₂ nas torres utilizando o sensor AVIRIS, resultando no mapeamento de fluxos fotossintéticos em uma paisagem de floresta boreal. Fuentes et al. (2006) apresentaram um ajuste linear com coeficiente de determinação 0,96, entre os índices PRI e NDVI, usando o sensor AVIRIS e as medidas de fluxo de torres em um ecossistema de semiárido no sul da Califórnia (Estados Unidos).

As correlações mais baixas nesse estudo, quando comparadas com os resultados de Rahman et al. (2000; 2001) e Fuentes et al. (2006) podem ser explicadas por dois fatores, o tipo de sensor utilizado e a variabilidade de paisagens (naturais e antrópicas).

De acordo com Baptista (2003), as análises espectrais obtidas com o Hyperion apresentam menor coeficiente de correlação, pois são obtidos a 705 km de altitude, o que pode apresentar interferências acima da troposfera. Além disso, os espectros do AVIRIS são menos ruidosos, o que permite correlações superiores a 85%.

Para Cerqueira e Franca-Rocha (2007), existiam diferenças significativas entre os tipos de vegetação no Bioma Caatinga, por exemplo, quando são analisadas com o CO₂flux. Wylie et al. (2007) sugerem que na pastagem são necessárias séries temporais mais longas para fornecer estimativas precisas do estado ou tendências nos fluxos de CO₂ nos ambientes.

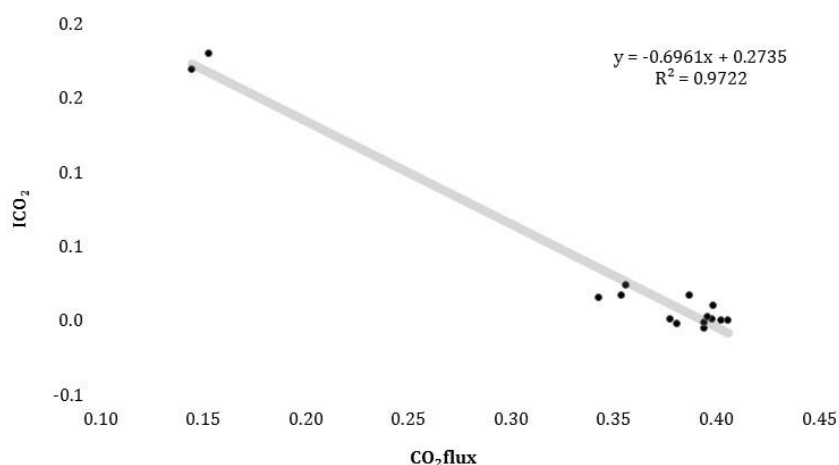
Validação da Modelagem do Sequestro Florestal de Carbono

Como forma de validação do modelo de sequestro florestal de carbono para ambientes tropicais, adotou-se o índice espectral ICO_2 que determina o conteúdo de CO_2 atmosférico com os dados de CO_2 medidos nas torres de concentração (ppm) e fluxo ($mol.m^{-2}.s^{-1}$). O ICO_2 foi desenvolvido por Baptista (2003) e mede o teor de dióxido de carbono na coluna do ar atmosférico adjacente aos alvos a partir da profundidade da feição centrada em $2,0 \mu m$.

Na análise final desse estudo, verificou-se que o CO_2flux respondeu melhor na modelagem do sequestro florestal de carbono, tanto nas áreas de florestas primárias, quanto nas áreas de intervenção antrópica, nos sítios experimentais na Amazônia Brasileira. Assim, a validação da modelagem foi realizada pela associação entre o CO_2flux e o índice ICO_2 .

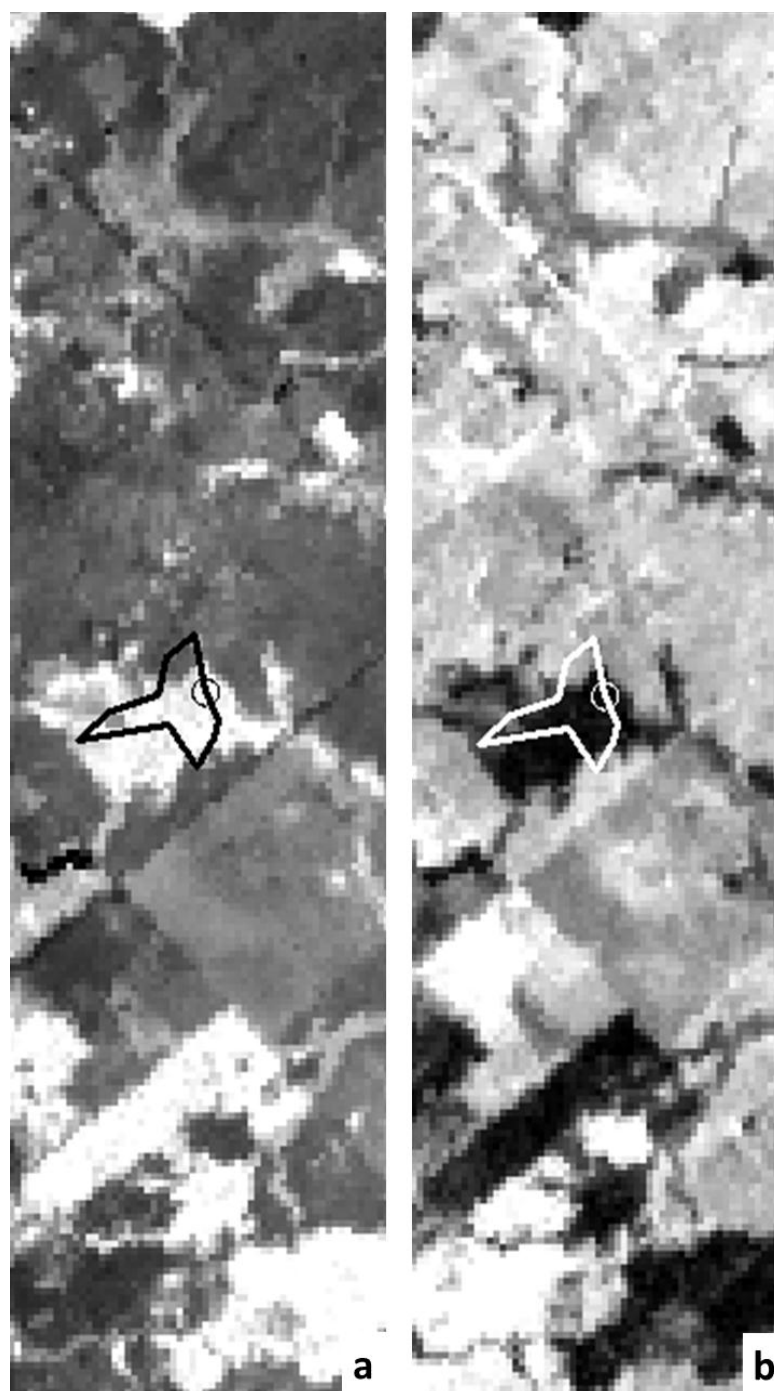
Na figura IV-19, pode-se verificar que o ICO_2 comporta-se inversamente proporcional ao CO_2flux , pois, quanto maior o sequestro florestal de carbono, menor é a concentração de CO_2 na coluna do ar atmosférico. Na figura, apresenta uma associação linear, com coeficiente de determinação elevado em torno de 0,97.

Figura IV-19. Regressão linear entre os dados de CO_2flux e ICO_2 .



Na figura IV-20, é possível verificar visualmente, na imagem do sensor Hyperion, como a modelagem e o índice se comportam. O vetor na imagem representa o *footprint* da torre FNS que é uma área recoberta por pastagem, gramíneas em crescimento que apresenta valores elevados de eficiência de sequestro de carbono (CO_2flux) e baixas concentrações de CO_2 atmosférico (ICO_2). Dessa forma, a imagem gerada pelo CO_2flux é inversamente proporcional à imagem gerada pelo índice, ICO_2 .

Figura IV-20. Cena de uma imagem Hyperion da Torre FNS: a) Imagem CO₂flux e b) imagem ICO₂.



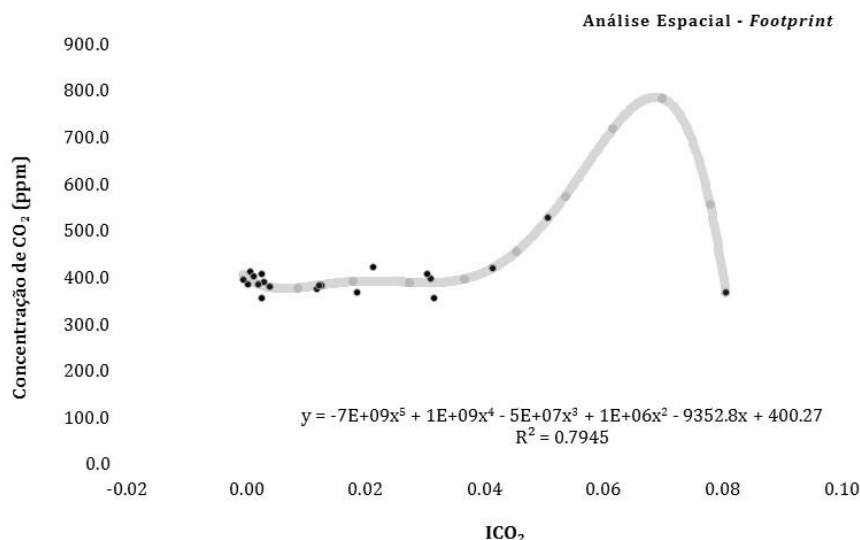
Baptista (2004) encontrou resultados que comprovam essa afirmativa por meio de regressão linear. Os resultados do autor descrevem uma função negativa e altos coeficientes de correlação de 0,86 e 0,87 para os dados AVIRIS e Hyperion.

Pedroza da Silva e Baptista (2013) analisaram a relação do CO₂flux e ICO₂ em uma floresta primária na Floresta Nacional do Tapajós (PA) e encontraram uma regressão linear

negativa com coeficiente de determinação de $R^2 = 0,84$, indicando uma efetiva validação do modelo CO_2flux com dados Hyperion.

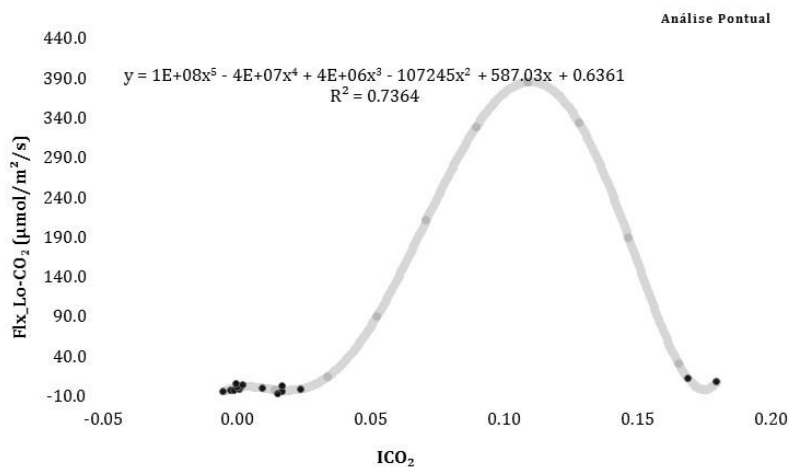
Os resultados mostram que o modelo CO_2flux é melhor ajustado com a associação entre a concentração de CO_2 (ppm), a partir do *footprint* ou a área de influência das torres (Figura IV-21).

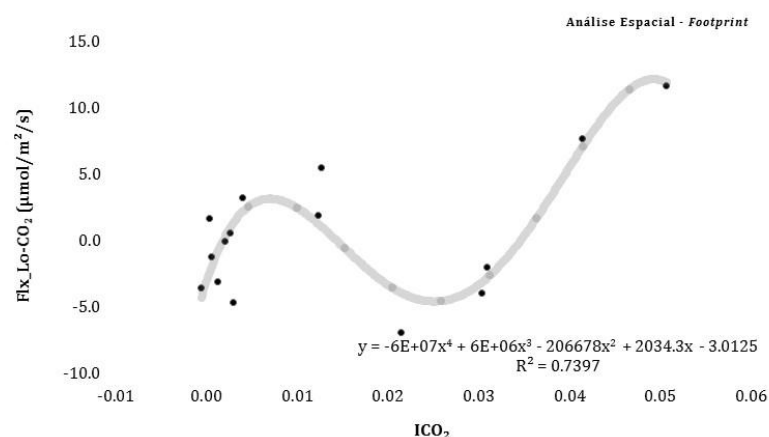
Figura IV-21. Análise do ICO_2 a partir da concentração de CO_2 (ppm).



Para os dados de fluxo ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), as melhores associações são ajustadas tanto com os dados no ponto (coordenadas geográficas das torres), quanto com os dados de *footprint* das torres (Figura IV-22).

Figura IV-22. Análise do ICO_2 a partir do fluxo de CO_2 ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).





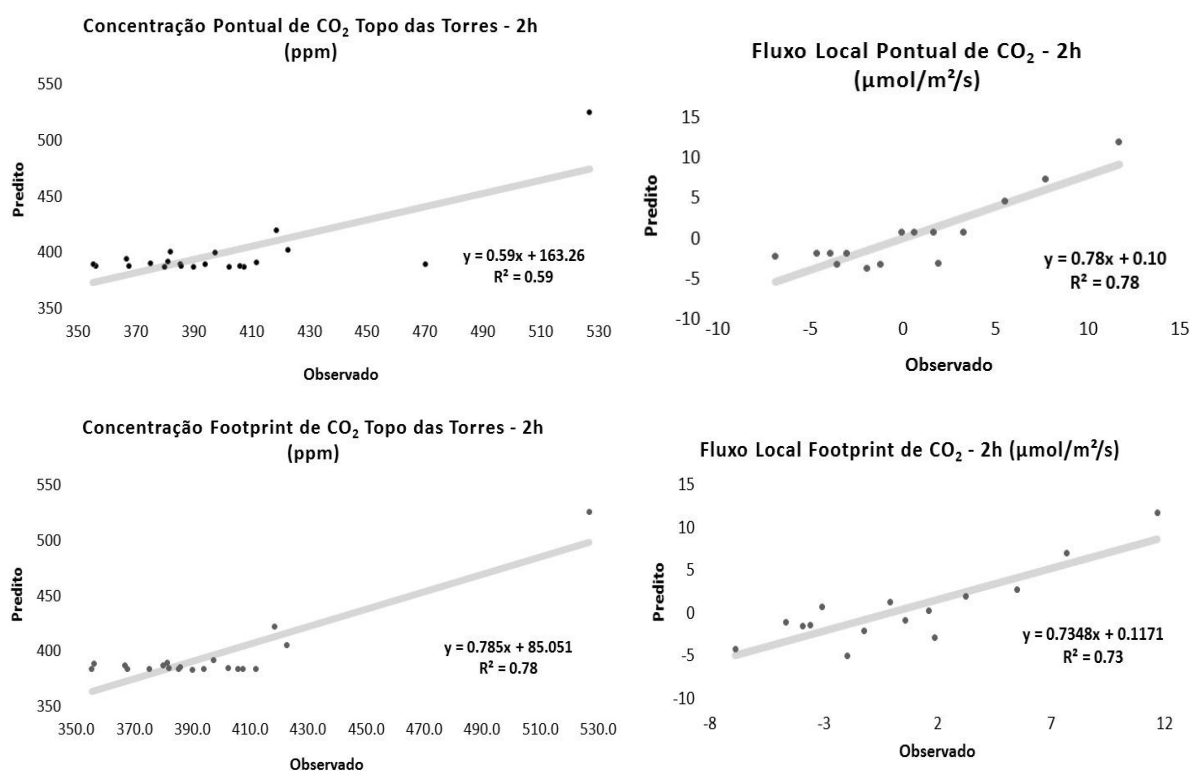
A estimação dos parâmetros foi deduzida a partir dos valores numéricos das variáveis espectrais e mensurações nas torres, utilizando o método de regressão polinomial quártica, pela equação IV-1.

$$Y' = a + (b1)X + (b2)X^2 + (b3)X^3 + (b4)X^4 \quad \text{(IV-1)}$$

Para cada relação entre as mensurações de campo e as mensurações das imagens de CO₂flux e ICO₂, em uma análise pontual e da área de influência (*footprint*), buscaram-se os melhores ajustes de curvas. Dessa forma, pode-se validar os modelos de CO₂flux e ICO₂ a partir da concentração pontual de CO₂ no topo das torres, fluxo pontual e para as análises com *footprint*.

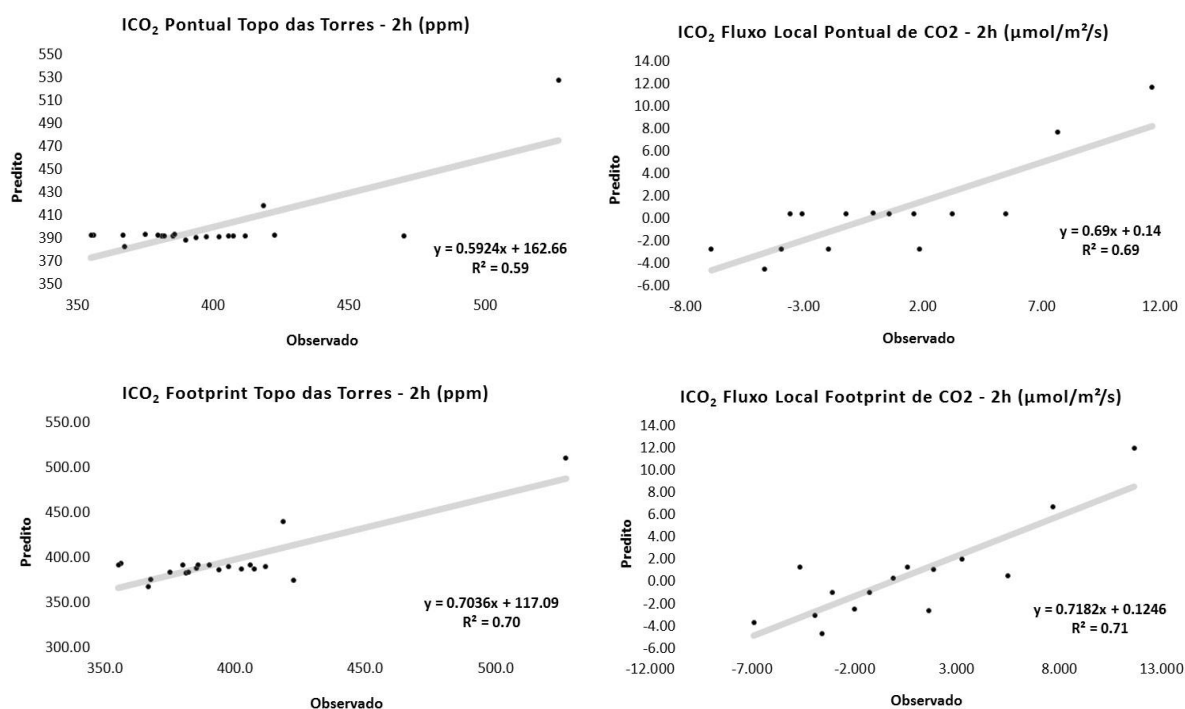
Na figura IV-23, pode-se verificar que a melhor validação com valores estimados do CO₂flux foi associada à análise pontual com dados de fluxo ($R^2=0,78$) e o footprint com dados de concentração de CO₂ ($R^2=0,78$).

Figura IV-23. Validação dos valores estimados do CO₂flux, a partir da análise pontual e footprint com dados de concentração e fluxo de CO₂.



Na figura IV-24, a melhor validação dos valores estimados do ICO₂ foi associada à análise da área de influência (*footprint*) com dados de concentração ($R^2=0,70$) e fluxo de CO₂ apresentando coeficiente de determinação de 0,71).

Figura IV-24. Validação dos valores estimados do ICO_2 , a partir da análise pontual e footprint com dados de concentração e fluxo de CO_2 .



O teste de normalidade para a maioria das variáveis analisadas pela análise de validação dos valores estimados, o p-valor calculado ao nível de significância de 5%, apresentaram o $W_{cal} < W_{(0,05;21)} = 0,908$; $W_{cal} < W_{(0,05;20)} = 0,905$ e $W_{(0,05;15)} = 0,881$ e não são normalmente distribuídos na população (Tabela IV-15).

Tabela IV-15. Teste de Normalidade para Análise de Validação.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk	CO_2 flux e Conc. Pontual	CO_2 flux e Fluxo Pontual	CO_2 flux e Conc. Footprint	CO_2 flux e Flux Footprint	ICO_2 e Conc. Pontual	ICO_2 e Fluxo Pontual	ICO_2 e Conc. Footprint	ICO_2 e Flux Footprint
N	21	15	20	15	21	15	20	15
W_{cal}	0.401	0.812	0.407	0.883	0.339	0.758	0.553	0.857
p	0.005	0.010	0.005	0.054	0.004	0.009	0.006	0.023

Verificam-se, nas tabelas IV-16 e IV-17, que os testes de Wilcoxon-Mann-Whitney ou Teste U de similaridade apresentaram valores de t_{cal} menores que o $t_{0,05;\infty} = 1,96$, concluindo que não há diferença entre as informações obtidas a partir do CO_2 flux e ICO_2 , para as validações dos valores estimados com dados de campo de concentração (ppm) e fluxo ($mol.m^{-2}.s^{-1}$). Portanto, existe similaridade entre as variáveis analisadas.

Tabela IV-16. Teste de Similaridade do CO₂flux para Análise de Validação.

Teste <i>U</i> - Validação	CO ₂ flux e Conc. Pontual	CO ₂ flux e Fluxo Pontual	CO ₂ flux e Conc. <i>Footprint</i>	CO ₂ flux e Flux <i>Footprint</i>
U	196	110	198	110
U'	0.6163	0.1037	0.0541	0.1037
t	-0.3510	-0.0587	-0.0308	-0.0587
p	0.5377	0.9174	0.9569	0.9174

Tabela IV-17. Teste de Similaridade do ICO₂ para Análise de Validação.

Teste <i>U</i> - Validação	ICO ₂ e Conc. Pontual	ICO ₂ e Fluxo Pontual	ICO ₂ e Conc. <i>Footprint</i>	ICO ₂ e Flux <i>Footprint</i>
U	198	111	195	109
U'	0.566	0.0622	0.1353	0.1452
t	-0.3223	-0.0352	-0.0770	-0.0821
p	0.5714	0.9504	0.8924	0.8846

A validação da modelagem do sequestro florestal de carbono CO₂flux, pelo índice ICO₂ mostrou-se eficiente para uma regressão não linear com coeficiente de determinação de 0,73 e correlações não lineares fortes positivas de 0,71 e 0,60 para as análises pontual de fluxo e de concentração, respectivamente, no pixel correspondente as coordenadas geográficas das torres (Tabela IV-18).

Tabela IV-18. Matriz de Correlação de Canônica para os dados de ICO₂.

<i>Validação do ICO₂</i> <i>Correlação Canônica</i>	ICO ₂ (Pontual)	ICO ₂ (<i>Footprint</i>)
ICO ₂ (Ponto)	1.00	---
ICO ₂ (<i>Footprint</i>)	---	1.00
Concentração CO ₂ (ppm) (2h)	0.609 ($p < 0.01$)	0.254 ns*
Fluxo de CO ₂ (mol.m ⁻² .s ⁻¹) (2h)	0.717 ($p < 0.01$)	0.496 ns

*Onde ns corresponde a não significativo

O ICO₂ apresenta melhor ajustamento para dados de fluxo no pixel, com correlação positiva indicando que, à medida que aumenta o fluxo de CO₂ na coluna do ar atmosférico, também, eleva-se os valores de ICO₂ nas imagens do sensor Hyperion, e, expõe que 71% do fluxo de CO₂ são explicados pelo teor de CO₂ disponível na coluna atmosférica nos ambientes estudados.

Se o ICO_2 comporta-se inversamente proporcional ao CO_2 flux, deduzindo que, quanto maior o sequestro florestal de carbono, menor é a concentração de CO_2 na coluna do ar atmosférico, então, para as imagens Hyperion com pontos coletados durante a fase clara da fotossíntese e associados aos dados de concentração de CO_2 das torres micrometeorológicas, pela tabela IV-19, infere-se que, durante o dia:

- Nos ambientes estudados (naturais e antrópicos) absorvem maior quantidade de CO_2 com 60% (pontual) e 81% (*footprint*) pelo processo de fotossíntese e outros 40% e 19% são explicados por outros fatores, ao mesmo tempo em que a variação de CO_2 na atmosfera, constatado pelo ICO_2 apresentava-se mais baixa em torno de 60% (pontual) e 25% (*footprint*).

Tabela IV-19. Validação do modelo de sequestro florestal de carbono, com dados de concentração (ppm) pelo ICO_2 .

Análise de Correlação	CO_2 obtidos em Campo	Modelos Espectrais	Validação do Modelo pela Variação (%) de CO_2 nos Ambientes
Análise Pontual	Concentração (ppm)	CO_2 flux	64%
		ICO_2	60%
Análise Espacial - <i>Footprint</i>	Concentração (ppm)	CO_2 flux	81%
		ICO_2	25%

Observa-se que os dados das análises espectrais (pontual e *footprint*) adquiridos por meio do sensor Hyperion indicados pelas correlações canônicas e pelos testes de similaridade de *Wilcoxon-Mann-Whitney* apresentam comportamento análogo ao comportamento de CO_2 obtido em campo observado pela concentração (ppm) baixa durante o dia, compreendido pelas correlações negativas de CO_2 flux, ou seja, quando se aumenta a absorção de CO_2 verificado na modelagem, diminuem a concentração de CO_2 na atmosfera obtidos em campo. O ICO_2 , por outro lado, apresenta correlação positiva indicando que, à medida que aumenta o fluxo de CO_2 na coluna do ar atmosférico, eleva-se os valores de ICO_2 nas imagens do sensor Hyperion.

Dessa forma, pode-se aceitar a hipótese desta tese, com base nas análises estatística e afirmar que as medições indiretas da concentração de CO_2 podem ser monitoradas por meio de sensoriamento remoto hiperespectral e permitem a compreensão de sua dinâmica, baseando-se nas modelagens espectrais de vegetação.

V. Conclusões

- A modelagem do sequestro florestal de carbono para as áreas naturais e antrópicas, pode ser realizada pelo índice CO₂flux, tanto com dados de concentração, quanto com dados de fluxo. Entretanto, para análises consistentes dos índices espectrais, verificou-se que as etapas que antecedem o processamento do CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 são de suma importância e devem ser cuidadosamente processadas, uma vez que o sensor Hyperion possui imagens mais ruidosas, comparadas a outros sensores hiperespectrais.
- As correlações entre as variáveis mensuradas entre o CO₂flux, a concentração e o fluxo são inversamente proporcionais, indicando maior atividade fotossintética, medida pelo CO₂flux, quando a concentração (ppm) é menor, e a intensidade de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) é negativa na camada atmosférica.
- Medidas diretas de CO₂ (ppm) no topo das torres são mais eficientes para a correlação com índices espectrais do que as medições coletadas ao longo das torres. Contudo, os melhores ajustes para o CO₂flux foram apresentados para a associação com dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹).
- Os melhores ajustes para o CO₂flux pontual foram apresentados para a associação com dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹), enquanto que as análises a partir do *footprint* apresentaram melhores resultados com dados de concentração de CO₂ (ppm) no topo das torres.
- O ICO₂ mostrou-se muito eficiente na validação do modelo de sequestro florestal de carbono, além de se relacionar muito bem com os conteúdos de CO₂ na coluna de ar atmosférico adjacente aos alvos medidos pelas torres em diferentes contextos de uso e ocupação, referentes aos sítios experimentais estudados na Amazônia Brasileira.
- O CO₂flux apresenta comportamento análogo ao comportamento de concentração e fluxo de CO₂, durante o dia, uma vez que, quando se aumenta a absorção de CO₂

verificado na modelagem, diminui a concentração e o fluxo de CO₂, enquanto que o ICO₂ verifica o aumento do conteúdo de CO₂ na coluna atmosférica, verifica-se também, o aumento da concentração e fluxo de CO₂ na atmosfera obtidos em campo.

- As medições indiretas da concentração de CO₂ podem ser monitoradas por meio de sensoriamento remoto hiperespectral e permitem a compreensão de sua dinâmica, baseando-se nas modelagens espectrais de vegetação, afirmando que a hipótese proposta nesta tese é verdadeira.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Novos estudos em outros domínios morfoclimáticos e com outros sistemas sensores devem ser incentivados para permitir a compreensão e o monitoramento do ciclo do carbono por meio de dados de sensoriamento remoto.
- Para áreas de influências (*footprint*) extensas que envolvem a leitura de pixels claros e escuros em uma mesma imagem hiperespectral, propõe-se, estratificar as áreas e realizar as modelagens separadamente.
- Para a análise dos índices de vegetação no dia da passagem do sensor pelas torres micrometeorológicas, as mensurações (concentração e fluxo de CO₂) poderiam, também, ser obtidas com a média do dia, na fase clara da fotossíntese.
- Para estudo com maior universo amostral, deve-se levar em consideração a variação temporal dos dados de campo.
- Outros estudos, nesta mesma linha de atuação, são interessantes a partir da abordagem do CO₂ em uma associação com áreas de florestas primárias e áreas de exploração seletiva de madeira na Amazônia Brasileira.

Referências Bibliográficas

ACCIOLY, L. J. O.; GARÇON, E. A. M.; BARROS, M. R.; BOTELHO, F. Avaliação de alvos em áreas sob desertificação no semi-árido paraibano com bases nos sensores Hyperion e Landsat 7 ETM+. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, Artigos, p. 347-353, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Região Hidrográfica Amazônica**. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>. Acesso em 16 de janeiro de 2014.

AGUIAR, R. G.; RANDOW, C. V.; FILHO, N. P.; 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.

AGUIAR, R., G. **Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia**. 2005. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Cuiabá, 2005.

AHMAD, F. Pixel Purity Index Algorithm and n-Dimensional Visualization for ETM+ Image Analysis: A Case of District Vehari. **Global Journal of Human Social Scienc**, vol XII Issue X"V Version I, 2012.

ALMEIDA, S.A.S.; SILVA, O.F.; MELO, E.M.K. DE; MOREIRA, J.C.; ORTIZ, J. DE O.; AMARAL, S.; SOARES, J.V.; ALVES, D.S. Mapeamento de cobertura da terra utilizando técnicas de processamento de imagens na região de Arquimedes (RO-BR), com ênfase às florestas secundárias. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, Salvador, 1996. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996.

ALVES, E. D. L.; SILVA, S. T. Direção e velocidade do vento em uma floresta de transição amazônia-cerrado no norte de Mato Grosso - Brasil. **B.goiano.geogr**, Goiânia, v. 31, n. 1, p. 63-74, 2011.

ANDRAE, F. H. **Ecologia Florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1978.

ARAUJO, A. C., KRUIJT, B., NOBRE, A.D., DOLMAN, A.J., WATERLOO, M.J., MOORS, E.J., SOUZA, J.S. Nocturnal accumulation of CO₂ underneath a tropical forest canopy along a topographical gradient. **Ecological Applications**, 18(6), p.1406–1419, 2008.

ARAUJO, L. S. **Análise da cobertura vegetal e de biomassa em áreas de contato floresta/savana a partir de dados Tm/Landsat E Jers-1**. 1999. 125p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 1999.

ARTAXO, P.; SILVA DIAS, M. A. F.; Nuvens de fumaça das queimadas alteram o clima da Floresta Amazônica. **Revista FAPESP**, p.88: 30-25, 2003.

ASNER, G. P.; CARLSON, K. M.; MARTIN, R. E. Substrate age and precipitation effects on Hawaiian forest canopies from spaceborne imaging spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v.98 p.457 – 467, 2005a.

ASNER G.P.; ELMORE, A. J.; HUGHES, R. F.; WARNERA, A. S.; VITOUSEKC, P. M. Ecosystem structure along bioclimatic gradients in Hawai'i from imaging spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v.96, p. 497 – 508, 2005b.

ASNER, G. P., KELLER, M.; LENTINI, M.; MERRY, F.; SOUZA JR, C. Extração seletiva de madeira e sua relação com desmatamento. **Amazonia and Global Change**, Copyright by the American Geophysical Union, 186, 2009.

ASNER, G. P., KNAPP, D. E.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, P. J. C.; KELLER M.; SILVA, J. N. M. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science**, 310, p. 480-482, 2005.

ASNER, G. P.; NEPSTAD, D.; CARDINOT, G.; RAY, D. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 101, p. 6039–6044, 2004.

ASSUNÇÃO, G.V., FORMAGGIO, A.R. **O sensoriamento remoto na agricultura: conceitos Básicos, metodologias e aplicações**. São José dos Campos: INPE, 1989.

AYRES, J. M. **As matas de várzea do Mamirauá**. MCT-CNPq. Sociedade Civil Mamirauá. 3 Ed. Tefé-AM, 2006.

AYRES, M. **Aplicações estatísticas nas áreas das ciências bio-médicas**. Biostat: Belém-PA, 2007.

BAPTISTA, G. M. M. Processamento de Dados Hiperespectrais. In: **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). UnB: Brasília, 2011.

BAPTISTA, G. M. M. **Aquecimento Global: ciência ou religião?** Brasília: Hinterlândia Editorial, 2009.

BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectrais. **Geografia, Rio Claro**, v. 29, n. 2, p. 189-202, 2004.

BAPTISTA, G. M. M. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral: o novo paradigma nos estudos de solos tropicais**. Brasília: Universa, 2006.

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, Belo Horizonte, Brasil, 05- 10 abril 2003. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 1037-1044, 2003.

BAPTISTA, G. M. M., MUNHOZ, C. B. R. Comportamento do sequestro florestal de carbono, do conteúdo de CO₂ 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, XIV, Natal, 2009. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, p. 1071-1078, 2009.

BATISTELLA, M; MORAN, E. F. Dimensões humanas do uso e cobertura das terras na Amazônia: uma contribuição do LBA. **Acta Amazônica**. VOL. 35(2) p. 239-247, 2005.

BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M. Variáveis geomorfométricas locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-RO). **Acta Amazônica**, vol. 39(1) p. 81-90, 2009.

BISSO, A. B. A. **Utilização de dados do sensor HYPERON / EO-1 para análise das áreas de Mata Atlântica e de bananais**. 2010. 85p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BOX, E. O.; HOLBEN, N. B.; KALB, V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂flux. **Vegetation** p:80: 71-89, 1989.

BRAGA, P. I. S. Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da Floresta Amazônica. **Acta Amazonica**, 9(4), p. 53-80, 1979.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Classification of soybean varieties using different techniques: case study with Hyperion and sensor spectral resolution simulations. **Journal of Applied Remote Sensing**, 053533-1 Vol. 5, 2011.

BROWN, I. F.; ALECHANDRE, A. S. O carbono nos ecossistemas brasileiros. In: **As mudanças climáticas globais e os ecossistemas brasileiros**. MOREIRA, A. G.; SCHWARTZMAN, S. (Eds.). Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia; The Woods Hole Research Center; Environmental Defense, 165p, 2000.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO FORESTRY PAPER, 134. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, 55p, 1997. Disponível em <http://www.fao.org>. Acesso em abril de 2013.

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

CAMPOS, C. P. **A conservação das Florestas no Brasil, mudanças do clima e o mecanismo de desenvolvimento limpo**. 2001. 169p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2001.

CANAVESI, V.; FLÁVIO JORGE PONZONI, F. J.; VALERIANO, M. M. Estimativa de volume de madeira em plantios de *Eucalyptus* spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.3, p.539-549, 2010.

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p. 241-252, 1997.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 20 (1), 2002.

CÁUPER, G. C. B. **Biodiversidade Amazônica**. Manaus: Centro Cultural dos Povos da Amazônia – CCPA, 2006.

CERQUEIRA, D. B.; ROCHA, W. F.; Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio de Contas – BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 2413-2419, 2007.

COLTRI, P. P.; RAMIREZ, G. M.; WALTER, M. K. C.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S.; NASCIMENTO, C. R.; GONÇALVES, R. R. V. Utilização de índices de vegetação para estimativas não destrutivas da biomassa, estoque e sequestro de carbono do cafeeiro arábica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, Natal, 2009. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 121-128.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O.; GIELOW, R.; KUBOTA, P. Y. Calibração do “simplified simple biosphere model – SSiB” para áreas de pastagem e floresta na Amazônia com dados do LBA. **Acta Amazonia**. VOL. 35(2) p. 273 - 288, 2005.

D’AMELIO, M. T. S. **Estudo de gases de efeito estufa na Amazônia**. 2006. 178 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares, Programa de Pós-Graduação em Ciências, na área de Tecnologia Nuclear, São Paulo, 2006.

DALPONTE, M.; BRUZZONE, L.; VESCOVO, L.; GIANELLE, D. The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.2345–2355, 2009.

DATT, B.; MCVICAR, T. R.; VAN NIEL, T. G.; JUPP, D. L. B.; PEARLMAN, J. S. Preprocessing EO-1 Hyperion Hyperspectral Data to Support the Application of Agricultural Indexes. **Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, vol. 41, no 6, 2003.

DÍAS, F. R.; LÓPEZ, F. J. B. **Bioestatística**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DONOGHUE, D. N. M. Remote sensing: environmental change. Department of Geography, University of Durham, Durham DH1 3LE, UK. **Progress in Physical Geography**, v. 26,1, p. 144 -151, 2002.

DOW, K; DOWNING, T. E. **O atlas da mudança climática: o mapeamento completo do maior desafio do planeta**. Tradução Vera Caputo. São Paulo: Publifolha, 2007.

DUCART, D. F.; CRÓSTA, A. P.; FILHO, C. R. S. Processamento de imagens hiperespectrais do EO-1/Hyperion para o mapeamento de minerais de alteração hidrotermal na Patagônia Argentina. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, p. 6449-6451, 2007.

EHLERS, M. Sensoriamento Remoto para Usuários de SIG – Sistemas Sensores e Métodos: entre as exigências do Usuário e a Realidade. In: **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados: novos sistemas sensores: métodos inovadores / versão brasileira atualizada por Thomas Blaschke e Hermann Kux**, tradução Hermann Kux, 2ª edição: São Paulo: Oficinas de Textos, 2007.

EO-1 USER GUIDE. **Version 2.3 - 2003, Supporting materials are available**. Disponível em: <http://eo1.usgs.gov>; <http://eo1.gsfc.nasa.gov>. Acesso em: setembro, 2012

EWERS, R. M.; LAURANCE, W. F.; SOUZA, C. M. Temporal fluctuations in Amazonian deforestation rates. **Acta Amazônica**, v.35, p.303-310, 2008.

FEITOSA, R. Q.; COSTA, G. A. O.; CAZES, T. B.; FEIJÓ, B. Ajuste automático de parâmetros de segmentação. In: **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados: novos sistemas sensores: métodos inovadores / versão brasileira atualizada por Thomas Blaschke e Hermann Kux**, tradução Hermann Kux, 2ª edição: São Paulo: Oficinas de Textos, 2007.

FERREIRA FILHO. J. **Análise de tempo de amostragem para cálculos de fluxos em sistemas de covariâncias de vórtices turbulentos para florestas de transição do sudoeste da Amazônia**. 2004. 63p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2004.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Sci. Biol. Sci. Maringá**, v. 30, n. 4, p.379-390, 2008.

FITZ, P. R. **Cartografia básica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **Curso de Estatística**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 1996.

FUENTES, D. A.; GAMON, J. A.; CHENG, Y; CLAUDIO, H. C.; QIU, H.; MAO, Z.; SIMS, D. A.; RAHMAN, A. F.; OECHEL, W.; LUO, H. Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, p.312 - 323, 2006.

GALLON, M. M. P.; SANCHES, L.; ROBERTO DE PAULO, S. Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel uma floresta tropical de transição amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p. 291- 300, 2006.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; SANTOS, J. R.; MOURA, Y. M. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 21, p. 291–300, 2013.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; REUNIG, F. M. Relações entre índices de vegetação e produtividade de soja com dados de visada fora do nadir do sensor Hyperion/EO-1. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, p. 1095-1102, 2009.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discriminação De Variedades De Cana-De-Açúcar Com Dados Hiperespectrais Do Sensor Hyperion/EO-1. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.o 57/01, 2005.

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**, vol. 112, p. 492-501, 1997.

GOMES, D.; VICENTE, L. E.; SILVA, R. F. B.; PAULA, S. C.; RENAN PFISTER MAÇORANO, R. P.; VICTORIA, D. C.; BATISTELLA, M. Uso de dados MODIS e AIRS para obtenção de parâmetros de correção atmosférica. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

GOSAT PROJECT. **Greenhouse gases observing satellite**. Disponível em http://www.gosat.nies.go.jp/index_e.html. Acesso em 23 mar. 2014.

GOWEN, A.A., O’DONNELL, C.P., CULLEN, P.J., DOWNEY, G., FRIAS, J.M. Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control. **Trends in Food Science & Technology**, v.18, p. 590-598, 2007.

GRAÇA, A. P. M. L. **Monitoramento e caracterização de áreas submetidas à exploração florestal na Amazônia por técnicas de detecção de mudanças**. São José dos Campos: INPE, 257p, 2006.

GRACE, J., LLOYD, J., McINTIRE, J. et al. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonian. **Global Change Biology**, v. 1, p. 1-12, 1995.

GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p.65 – 74, 1988.

HARRIS, A.; DASH, J. The potential of the MERIS terrestrial chlorophyll index for carbon flux estimation. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1856 - 1862, 2010.

HENRIQUES, L. M. P.; WUNDERLE JR, J. M.; OREN, D. C.; WILLIG, M. R. Efeitos da exploração madeireira de baixo impacto sobre uma comunidade de aves de sub-bosque na floresta Nacional do Tapajós, Pará, Brasil. **Acta Amazônica**, vol. 38(2), p. 267-290, 2008.

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

HUETE, A. R., 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, p. 195–213, 2002.

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.

HUTYRA, L.R., MUNGER, J. W.; GOTTLIEB, E. W.; DAUBE, B. C.; CAMARGO P. B.; WOFYSY. S. C. LBA-ECO CD-10. **CO₂ Profiles at km 67 Tower Site, Tapajos National Forest**. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A., 2008. doi:10.3334/ORNLDAAAC/855.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação** brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa Clima do Brasil**. Disponível na Internet via <http://www.ibge.org.br>. Acesso em maio de 2013.

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

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA - IPAM. **Perguntas e Respostas sobre Mudanças Climáticas**. Fundação Biblioteca Nacional, Belém, 2002. 30p

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**; tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) ... [et al.]. Parêntese: São Paulo, 2009.

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, p. 3833-3845, 2008.

JPL. **Jet Propulsion Laboratory**. Disponível em: <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages>. Acesso em 15 fev. 2014.

JUNK, W. J. Ecology of Várzea, floodplain of Amazonian white water rivers. In: **The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river in its basin**. H. Sioli ed. Dr. W Junk Publ., Dordrecht, 1984.

KEELING, C. D.; WHORF, T. P.; WAHLEN, M.; PLICHT, J. V. D. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. **Nature**, v. 375, 1995.

KLJUN, N., P. CALANCA, M.W. ROTACH, H.P. SCHMID. A Simple Parameterisation for Flux Footprint Prediction. **Boundary-Layer Meteorology**, 112, 2004, p. 503-523.

KNOX, N.M.; SKIDMORE, A. K.; PRINS, H. H. T.; ASNER, G. P.; WERFF, H. M. A. V.; BOER, W. F.; WAAL, C. V.; KNEGT, H. J. K.; KOHI, E. M.; SLOTOW, R.; GRANT, R. C. Dry season mapping of savanna forage quality, using the hyperspectral Carnegie Airborne Observatory sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p.1478–1488, 2011.

KRUSE, F.A. Comparison of ATREM, ACORN, FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, **CO**, 1-10, 2004.

LANDIM, P. M. B. **A análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficinas de Textos, 2011. ISBN 978-85-7075-032-8.

LARGE SCALE BIOSPHERE-ATMOSPHERE EXPERIMENT IN AMAZONIA – LBA. Disponível em <https://lba.inpa.gov.br/lba/index.php?p=intro&t=1>. Acesso em janeiro de 2014.

LARGE SCALE BIOSPHERE-ATMOSPHERE EXPERIMENT IN AMAZONIA – LBA. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA / Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. Disponível em lba.cptec.inpe.br. Acesso em junho de 2011.

LATORRE, M.; CARVALHO JÚNIOR O.A.; CARVALHO, A.P.F., SHIMABUKURO, Y.E. Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos. **Espaço & Geografia**, v. 5, p. 153-178, 2002.

LATORRE, M.; OSMAR ABÍLIO DE CARVALHO JÚNIOR, O. A.; DIAS, L. A. V., MENESES, P. R. Análise comparativa dos principais métodos para correção atmosférica de imagens hiperespectrais AVIRIS. **Anais X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, 21 – 26 de abril de 2001, INPE.

LEAL, L. S. M. **Variação sazonal do fluxo e da concentração de CO₂ na região leste da Floresta Amazônica** – PA. 2000. 56p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2000.

LEMOS, A. L. F.; VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU. **BNDES – Seção Floresta**, v. 32, p. 153-192, 2010.

LEMOS, D. M. **Estudo sobre um classificador adaptativo para análise de dados de alta dimensionalidade com um conjunto limitado de dados de treinamento**. 2003. 83p. Dissertação (Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; SOBRAL, L. **Fatos florestais da Amazônia**. Imazon: Belém, 2003.

LEOPOLDO, P.R.; FRANKEN, W.; SALATI, E.; RIBEIRO, M.N.G. Towards a water balance in Central Amazonian region. **Experientia**, 43:222-233, 1987.

LICZBINSKI, C. A. **Classificação de dados imagem em alta dimensionalidade, empregando amostras semi-rotuladas e estimadores para as probabilidades a priori**. 2007. 152p. Dissertação (Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LINN, R. M. **Avaliação dos Modelos de Mistura Espectral MESMA e SMA aplicados aos dados hiperespectrais Hyperion/EO-1 adquiridos na Planície Costeira RO Rio Grande do Sul**. 2008. 153p. Dissertação (Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEPSSRM, Porto Alegre, 2008.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2007.

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends in Ecology and Evolution**, v.15, p.332-337, 2000.

MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 31.593-31.612, 1998.

MARTINS, C. R.; PEREIRA, P. A. P.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B. **Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a importância na química da atmosfera**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, N° 5 – Novembro, São Paulo, 28-41, 2003.

MARTINS, L.N.; BAPTISTA, G.M.M. Análise multitemporal do sequestro florestal de carbono no projeto de assentamento Carão, Acre. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, n. 06, p. 1648-1657, 2013.

MENDONÇA, M. J. C.; GUTIEREZ, M. B. S. O Efeito Estufa E O Setor Energético Brasileiro. MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. **IPEA**, n.719, Rio de Janeiro, 2000.

MENESES, P. R. Princípios De Sensoriamento Remoto. In: **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). UnB: Brasília, 2011.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. In: **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). UnB: Brasília, 2011.

MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; HUTYRA, L. R.; KELLER, M.; SALESKA, S. R.; WOFSY, S. C.; FIGUEIRA, A. M. S.; DA ROCHA, H. R.; DE CAMARGO, P. B. Reduced impact logging minimally alters tropical rainforest carbon and energy exchange. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, p. 19431-19435, 2011.

MILLER, S.; GOULDEN, M.; DA ROCHA, H.R. LBA-ECO CD-04. **Meteorological and Flux Data, km 83 Tower Site, Tapajos National Forest**. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A, 2009. doi: 10.3334/ORNLDAAC/946.

MILONE, G. **Estatística: Geral e Aplicada**. São Paulo: Thomson Learning, 2004.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; LAERTE G. FERREIRA, L. G.; SANO, E. E. Discrimination and biophysical characterization of cerrado physiognomies with EO-1 Hyperspectral Hyperion. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte, Brasil, INPE, p. 1077-1082, 2003.

MOLION, L. C. B. **Variabilidade e Alterações Climáticas**. Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, 2007.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 4.ª Ed. Atual. e ampl. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2011.

MOURA, V.; VON RANDOW, C.; MANZI, A. O. Estimativa do footprint de torres em área de platô e baixio na Reserva Cuieiras, Amazônia Central. In: V Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. **Anais**, 2007.

NASCIMENTO, R. L. **Análise comparativa dos componentes do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta na Amazônia**. 2012. 78p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **Lewis (SSTI 1)**. Disponível em http://space.skyrocket.de/doc_sdat/lewis.htm Acesso em agosto de 2014.

NCDC-NOOA. **Climate Forcings**. Disponível em <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/gw-forcing.html>. Acesso em setembro, 2012.

NEPSTAD, D. C., et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire, **Nature**, 398, p. 505-508, 1999.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças Climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, vol.59 no.3 São Paulo July/Sept. 2007.

- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4.^a edição. São Paulo: Blucher, 2010.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto. Princípios e Aplicações**. 3^a edição São Paulo: Blucher, 2008.
- OLIVEIRA, S. M. B. Base científica para a compreensão do aquecimento global. In: **Aquecimento Global: frias contendidas científicas**. VEIGA, J. E. S. (Org). São Paulo: Editora Senac São Paulo, 112 p. 2008.
- PACHECO, M. R. P. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estud. av. [online]**, vol.4, n.9, p. 204-220, 1990.
- PAPES, M.; TUPAYACHI, S, R.; MARTÍ'NEZ, PETERSON, A.T.; POWELL, G.V.N. Using hyperspectral satellite imagery for regional inventories: a test with tropical emergent trees in the Amazon Basin. **Journal of Vegetation Science**, 21, p.342–354, 2010.
- PAULINO, V. T.; PAULINO, T. S. Avanços no Manejo de Pastagens Consorciadas. **Revista científica eletrônica de agronomia**, n. 3, 2003.
- PEARLMAN, J.; CARMAN, S.; SEGAL, C.; JARECKE, P.; BARRY, P.; BROWNE, W. Overview of the Hyperion Imaging Spectrometer for the NASA EO-1mission. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, IEEE 2001 International, 2001. **Anais ...** vol. 7, p. 3036-3038, 2001.
- PEDROZA DA SILVA, S. C.; BAPTISTA, G. M. M. Variações na Modelagem do Sequestro Florestal de Carbono por meio de Dados Hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2013. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.8484, 2013.
- PEREIRA, O. A. **Determinação do fluxo de CO₂ numa área monodominante de cambará no norte do pantanal mato-grossense**. 2009. 75p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Mato Grosso - Instituto De Física, Cuiabá, MT, 2009.
- PETROPOULOS, G. P.; KALAITZIDIS, C.; VADREVU, K. P. Support vectormachinesandobject-basedclassificationforobtaining land-use/cover cartography from Hyperion hyperspectral imagery. **Computers & Geosciences**, 41, p.99–107, 2012.
- PINTO, A. C. M.; SOUZA, A. L.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C. C.; MINETTE, L. J.; DO VALE, A. B. Análise de danos de colheita de madeira em floresta tropical úmida sob regime de manejo florestal sustentado na Amazônia ocidental. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.459-466, 2002.
- PINTO-COELHO, R. M. **Fundamentos em ecologia**. Porto Alegre: Artmed, 2000.
- PIZARRO, M. A.; EPIPHANIO, J.C.N.; GALVÃO, L. S. Caracterização Mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 10, p. 1277-1286, 2001.
- PLAZA, A.; BENEDIKTSSON; J. A; BOARDMAN J. B.; BRAZILE, J.; BRUZZONE, L.; CAMPS-VALLS, G.; CHANUSSOT, J.; FAUVEL, M.; GAMBA, P.; GUALTIERI, A.; MARCONCIN, M.; TILTON, J.C.; TRIANNI, G. Recent advances in techniques for hyperspectral image processing. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.S110–S122, 2009.
- PONZONI, F. J. **Comportamento espectral da vegetação: sensoriamento remoto reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Universidade de Brasília - UNB, p. 157-199, 2001.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed., 2010.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. São José dos Campos, SP: Oficina de Textos. 2012.

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

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D. A.; PRENTISS, D. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, vol. 106, no. D24, pages 33,579-33,591, 2001.

RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS Workshop. Proceedings. **Anais...** JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.

RAMSEY III, E.; RANGOONWALA, A.; NELSON, G.; EHRlich, R.; MARTELLA, K. Generation and validation of characteristic spectra from EO1 Hyperion image data for detecting the occurrence of the invasive species, Chinese tallow. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 26, No. 8, 20, p. 1611-1636, 2005.

RANZANI, G. Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. **Acta Amazônica**, 10(1): p. 7-41, 1980.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S. **Biologia vegetal**. Tradução de Jane Elizabeth Kraus. 6.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001.

REYDON, B. P. O desmatamento da Floresta Amazônica: causas e soluções. In: **Economia Verde: Desafios e oportunidades**. Belo Horizonte: Conservação Internacional, p. 143-155, 2011. ISSN 1809-8185.

RIBEIRO, C. A. D.; ABRAHÃO, C. P.; XAVIER, A. C. Relações entre variáveis climáticas e séries multitemporais com EVI em floresta natural e em cultivo agrícola. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 196-204, 2009

RIBEIRO, J.E.L.S, HOPKINS, M.J.G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C.A.; COSTA, M.A.S.; BRITO, J.M.; SOUZA, M.A.D.; MARTINS, L.H.P.; LOHMANN, L.G.; ASSUNÇÃO, P.A.C.L.; PEREIRA, E.C.; SILVA, C.F.; MESQUITA, M.R.; PROCÓPIO, L.C. **Flora da Reserva Ducke**: Guia de Identificação das Plantas Vasculares de uma Floresta de Terra-firme na Amazônia Central. Manaus: INPA. 793 p. 1999.

RICKLEFS, R. E. **A Economia da Natureza**. Rio de Janeiro: Guanabara, Koogan, 2009.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O; ÁVILA, S; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, vol.19 no.1 Belo Horizonte, 2009.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2004.

ROUSE, J. W.; HAAS, R.H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W., "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS". In: Proceeding of ERTS-1 Symposium. **Anais ... NASA**, United States, n. 3. p. 309-317, 1973.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M., GALVÃO, L. S.; PEREIRA FILHO, W. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Revista Acta Amazônica**, v.37(2) p.269-280, 2007.

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

SANCHES, I. D'A. **Sensoriamento remoto para o levantamento espectro temporal e estimativa de área de culturas agrícolas**. 2004. 120p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2004.

SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da Floresta Amazônica**. 1999. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 1999.

SCHRAMM, V. F.; VIBRANS, A. C. Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí. **Dynamis revista tecno-científica**, vol.13, n.1, p. 59-69, 2007.

SCHUBART, Herbert O.R. Ecologia e utilização das florestas. In: **Amazônia: desenvolvimento, integração e ecologia**. Manaus: INPA, 1983.

SCHUEPP, P.H.; LECLERC, M. Y.; MACPHERSON, J. L.; DESJARDINS, R. L. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. **Boundary-Layer Meteorology** 50, p. 355-373, 1990.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.33, Número Especial, p.1729-1737, 1998.

SHIPPERT, P. Why use hyperspectral imagery? Photogrammetric Engin. **Remote Sensing**, v.70, p. 377-380, 2004.

SILVA JÚNIOR, R. S. **Concentrações e Fluxos de Dióxido de Carbono (CO₂) Sobre Pastagens na Região Amazônica**. 2003. 93p. Dissertação (Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Exatas e Naturais, Maceió, 2003.

SILVA, C. R. **Uso De Algoritmos Genéticos Como Redutor De Dimensionalidade Na Classificação De Imagens Hiperespectrais**. 2006. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SIOLI, H. Sedimentation in Amazonasgebiet. **Geol. Rundschau** 45:608-33, 1975.

SOUZA, A. A. **Estudo De Fitofisionomias De Cerrado Com Dados De Sensor Hyperion/EO-1**. 2009. 120p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2009.

SOUZA, E. M. F. R.; VICENS R. S.; CRUZ, C. B. M. Remoção de *Stripes* e Correção Atmosférica de Imagem EO-1/Hyperion, no estado do Rio de Janeiro. 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.8484, 2011.

SPENCER, R. W. **Climate Confusion: How Global Warming Hysteria Leads to Bad Science, Pandering Politicians and Misguided Policies that Hurt the Poor.** Encounter Books, 2008, 150 p. ISBN 1-59403-210-6.

TEICHRIEB, C., A. **Trocas de carbono atmosférico sobre dois diferentes sistemas de plantio de milho no Sul do Brasil Santa Maria, RS, Brasil.** 2012. 105p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal De Santa Maria, Centro De Ciências Naturais e Exatas, Programa De Pós-Graduação Em Física, Santa Maria-RS, 2012.

TISOT, D. A.; FORMAGGIO, A. R.; RENNÓ, C. D.; GALVÃO, L. S. Eficácia de dados Hyperion/EO-1 para identificação de alvos agrícolas: comparação com dados ETM+/LANDSAT-7. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.27, n.2, p.511-519, 2007

TOLENTINO, M.; ROCHA-FILHO, R. C.; SILVA, R. R. **A atmosfera terrestre.** 2.ed., São Paulo: Moderna, 2004.

TORRES, P. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à climatologia.** São Paulo: Cengage Learning, 2011.

TOTTEN, M. **Getting It Right:** Emerging markets fostering carbon in forests. Forest Trend: World Resources Institute, 1999.

UNGAR, S.G.; PEARLMAN, J.S.; MENDENHALL, J.A.; REUTER, D. Overview of the Earth Observing One (EO-1) mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p. 1149-1159, 2003.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Versão digital 2. Recife, 2006. 463p.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal.** Rio de Janeiro: IBGE, 123p, 1991.

VESALA, T.; KLJUN, N; RANNIK, U.; RINNE J.; SOGACHEV, A.; MARKKANEN, T.; SABELFELD, K.; FOKEN, TH.; LECLERC, M.Y. Flux and concentration footprint modelling: State of the art. **Environmental Pollution** 152. P 653e666, 2008.

VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L.; ANDRADE, R. G. Estimativa de propriedades biofísicas no mapeamento de pastagens utilizando espectroscopia de imageamento e dados do sensor EO1 – Hyperion. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.8575**

VIEIRA, E. L.; SOUZA, G. S.; SANTOS, A. R.; SANTOS SILVA, J. **Manual de Fisiologia Vegetal.** São Luís: EDUFMA, 230p, 2010.

VIEIRA, S., P.; BARBOSA DE CAMARGO, D. SELHORST, R. DA SILVA, L. HUTYRA, J. Q. CHAMBERS, I.F. BROWN, N. HIGUCHI, J. DOS SANTOS, S. C. WOFYSY, S. E. TRUMBORE; L.A. MARTINELLI, Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. **Oecologica**, 3, p. 468-479, 2004.

VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

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

VYAS, D.; KRISHNAYYA, N.S.R. MANJUNATH, K.R.; RAY, S.S.; PANIGRAHY, S. Evaluation of classifiers for processing Hyperion (EO-1) data of tropical vegetation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 13, p. 228–235, 2011.

WEBLER, A. D.; GOMES, J. B.; 2, AGUIAR, R. G.; ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR, L. J. G. Mudanças no uso da terra e o particionamento de energia no sudoeste da Amazônia. R. Bras. **Eng. Agríc. Ambiental**, v.17, n.8, p.868–876, 2013.

WILLIAMS, A. P.; HUNT Jr., E. R. Estimation of leafy spurge cover from hyperspectral imagery using mixture tuned matched filtering. **Remote Sensing of Environment**, 82 p. 446-456, 2002.

WYLIE, B. K.; FOSNIGHT, E. A.; GILMANOV, T. G; FRANK, A. B.; MORGAN, J. A.; HAFERKAMP, M. R.; MEYERS, T. P. Adaptive data-driven models for estimating carbon fluxes in the Northern Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v.106, p.399 - 413, 2007.

YIN, Z.; WILLIAMS, T.H.L. Obtaining spatial and temporal vegetation data from Landsat MSS and AVHRR/NOAA satellites images for a hydrologic model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.63, p.69-77, 1997.

ZANCHI, F. B.; GOMES, B. M.; RANDOW, C.; KRUIJT, B.; MANZI, A. O. Medições dos fluxos de dióxido de carbono e estimativa do “fetch” (área de influência) em pastagem e floresta em Rondônia. **Anais 1º Congresso de Estudantes do LBA, ciclagem e armazenamento do Carbono**, p. 13, 2002.

ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; AGUIAR, L. J.G.; Von RANDOW, C.; KRUIJT, B.; CARDOSO, L. F.; MANZI, A. O. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazônia**, vol. 39(2), p.335-348, 2009.

ZANZARINI; F. V; PISSARRA, T. C. T; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.17, n.6, p.608–614, 2013.

ZHAO, J.; CHEN, X.; BAO, A. M. Spatial representativeness of eddy covariance measurements using footprint analysis in arid areas. **Environ Earth Sci**, p.71:1691–1697, 2014.

ZULLO JUNIOR, J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 1994. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Campinas, 1994.

Anexos

Anexo A. Principais Índices de Vegetação Encontrados na Literatura.

Índice	Sigla	Equação	Referência
Índice de Vegetação pela Razão Simples <i>(Simple Ratio)</i>	SR	$SR = NIR / R_{red}$	Jordan (1969)
Índice de Vegetação pela Razão <i>(Ratio Vegetation Index)</i>	RVI	$RVI = NIR/VIS$	Pearson e Miller (1972)
Índice de Vegetação de Diferença Normalizada <i>(Normalized Difference Vegetation Index)</i>	NDVI	$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$	Rouse et al., 1973;
Índice de Brilho de Solo e Índice de Vegetação Verde <i>(Soil Brightness Index and Green Vegetation Index)</i>	SBI	$SBI = 0,332MSS4 + 0,603MSS5 + 0,675MSS6 + 0,262MSS7$ $GVI = 0,238MSS4 + 0,66MSS5 + 0,577MSS6 + 0,388MSS7$ onde: SBI = índice do brilho do sol GVI = índice do verde da vegetação	Kauth e Thomas (1976)
Índice de Vegetação pela Diferença <i>(Difference Vegetation Index)</i>	DVI	$DVI = NIR - VIS$	Richardson e Wiegand (1977)
Índice de Vegetação Perpendicular <i>(Perpendicular Vegetation Index)</i>	PVI	$PVI = [(R_{gg5} - R_{p5})^2 + (R_{gg7} - R_{p7})^2]^{1/2}$ onde: PVI = a distância perpendicular entre o ponto da vegetação e a linha as superfícies do solo abaixo da vegetação R _{gg} = reflectância da superfície do solo das bandas MSS5 e MSS7, correspondendo ao ponto de reflectância da vegetação R _p = reflectância do ponto da vegetação nas faixas MSS5 e MSS7	Richardson e Wiegand (1977)
Índice Verde Sobre Solo Nu <i>(Greenness Above Bare Soil)</i>	GABS	$GABS = GVI - 0,091178SBI + 5,58959$ onde: GABS = Índice verde sobre solo nu	Hay et al., (1979)
Índice de Diferença da Temperatura do Brilho	MPTD	$MPDT = (T_{bv} - T_{bh})$ onde: MPDT = Índice de Diferença da Temperatura do Brilho T _{bv} = temperatura do brilho de polarização vertical na faixa 37 GHz T _{bh} = temperatura do brilho de polarização horizontal na faixa 37 GHz	Choudhury et al (1987)
Índice de Vegetação Ajustado por Solo <i>(Soil Adjusted Vegetation Index)</i>	SAVI	$SAVI = \frac{(NIR - VIS)(1 + L)}{(NIR + VIS + L)}$ onde: $L = I_1 + I_2 = 2 $	Huete (1988)

Índice	Sigla	Equação	Referência
Índice de Vegetação Ajustado por Solo Transformado (Transformated Soil Ajusted Vegetation Index)	TSAVI	$TSAVI = \frac{a(NIR - aVIS - b)}{VIS + aNIR - ab}$ <p>onde: os valores de a e b são coeficientes obtidos com a reflectância do solo</p>	Baret et al., (1989)
Índice de Razão Ajustado por Solo (Soil Ajusted Ratio Vegetation Index)	SARVI	$SARVI = \frac{NIR}{(VIS + b/a)}$ <p>onde: os valores de a e b são coeficientes obtidos com a reflectância do solo</p>	Major (1990)
Índice da Condição da Vegetação	VCI	$VCI_j (\%) = \frac{100[NDVI_j - NDVI_{min}]}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$ <p>onde: VCI = Índice da Condição da Vegetação NDVI_j = NDVI no período j NDVI Max e NDVI min = são os valores históricos de NDVI máximo e mínimo no mesmo período</p>	Kogan (1990)
Índice de Vegetação com Resistência Atmosférica	ARVI	$ARVI = (NIR - RB)/(NIR + RB)$ <p>onde: ARVI = Índice de Vegetação com Resistência Atmosférica NIR = Banda do infravermelho próximo R = Banda Vermelha B = Banda Azul</p> $RB = R - Y(R - B)$ <p>onde: RB = Reflectância das combinações das bandas R e B Y = Fator de autocorreção atmosférica dependendo dos tipos de aerossóis B = Banda Azul</p> $Y = (\rho_{a-r}) / [(\rho_{a-b}) - (\rho_{a-r})]$ <p>onde: ρ a-r = Reflectância atmosférica na banda vermelha ρ a-b = Reflectância atmosférica na banda azul</p>	Kaufman e Tanré (1992)
Normalized Phaeophytinization Index	NPQI	$NPQI = (R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	Barnes (1992)
Photochemical Reflectance Index	PRI	$PRI_1 = (R_{528} - R_{567}) / (R_{528} + R_{567})$ $PRI_2 = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$ $PRI_3 = (R_{570} - R_{539}) / (R_{570} + R_{539})$	Gamon et al. (1992)
Vogelmann Indices	VOG	$VOG_1 = (R_{740} / R_{720})$ $VOG_2 = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$	Vogelmann et al. (1993);

Índice	Sigla	Equação	Referência
		$VOG_3 = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{720})$	
Índice de Vegetação Modificado com Linha de Solo Ajustado <i>(Modified Soil Adjusted Vegetation Index)</i>	MSAVI	$MSAVI = \frac{(NIR - VIS)(1 + Lo)}{(NIR + VIS + Lo)}$ onde: $Lo = 1 - 2^3 (NDVI \times WDV)$ $WDVI = NIR - a \times VIS$ $a =$ linha de declividade do solo	Qi et al., (1994)
Índice de linha do Solo com Resistência Atmosférica	TSARV I	$TSARVI = \frac{[a_{rb} (NIR - a_{rb} RB - b_{rb})]}{[(RB + a_{rb} NIR - a_{rb} b_{rb} + 0,08(1 + a_{rb}^2))]}$ onde: os valores de r e b representam a banda vermelha (R) e a banda azul (B)	Bannari et al., (1994)
Índice de Vegetação Ajustado por dois Eixos	TWVI	$TWVI = \frac{(NIR - VIS - W)(1 + L)}{(NIR + VIS + L)}$ onde: $W = 1,414D[1 - (x-l)/(m-l)]$ $D = (NIR_s - MVIS_s - l) / (1 + M^2)^{1/2}$ $NIR_s = [M(VIS_s)] + l$ $M =$ declividade da linha de reflectância do solo $l =$ intercepção da linha do solo $lm =$ intercepção da linha da cobertura máxima $lx =$ intercepção da linha da cobertura da vegetação	Li (1994)
Índice de Vegetação Angular	AVI	$AVI = \tan^{-1} \{[(\gamma_3 - \gamma_2)/\gamma_2](NIR - R)^{-1}\} + \tan^{-1} \{[(\gamma_2 - \gamma_1)/\gamma_1](G - R)^{-1}\}$ onde: $\gamma_1; \gamma_2; \gamma_3 =$ valor espectral da banda verde (G), vermelho (R) e NIR	Plummer et al., (1994)
Normalized Pigment Chlorophyll Index	NPCI	$NPCI = (R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	Penuelas et al. (1994)
Conteúdo de CO₂ no ar atmosférico	ICO ₂	$ICO_2 = (R_{2,037} - R_{2,007})$	Baptista (2004)
Índice da Condição da Temperatura do Brilho	TCI	$TCI_j = \frac{[Tb4_{max4} - Tb4_j]}{[Tb4_{max} - Tb4_{min}]}$ onde: TCI _j = Índice da Condição da Temperatura do Brilho Tb4 _j = Tb4 no período j Tb4 _{max} e Tb4 _{min} = são os valores históricos dos Tb4 máxima e mínima no mesmo período j.	Kogan (1995)
Renormalized Difference Vegetation Index	RDVI	$RDVI = (R_{800} - R_{670}) / \sqrt{(R_{800} - R_{670})}$	Rougean and Breon (1995)
Structure Insensitive Pigment Index	SIPI	$SIPI = (R_{800} - R_{450}) / (R_{800} + R_{450})$	Penuelas et al. (1995)

Índice	Sigla	Equação	Referência
Carter Indices	CTR	CTR ₁ = (R ₆₉₅ /R ₄₂₀) CTR ₂ = (R ₆₉₅ /R ₇₆₀)	Carter (1994,1996)
Simple Ratio Pigment Index	SRPI	SRPI = (R ₄₃₀ - R ₆₈₀)	Penuelas et al. (1995)
Lichtenthaler Indices	LIC	LIC ₁ = (R ₈₀₀ - R ₆₈₀)/(R ₈₀₀ + R ₆₈₀) LIC ₂ = (R ₄₄₀ / R ₆₉₀) LIC ₃ = (R ₄₄₀ / R ₇₄₀)	Lichtenthaler et al. (1996)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	OSAVI	OSAVI = (1 + 0,16)(R ₈₀₀ - R ₆₇₀)/(R ₈₀₀ + R ₆₇₀ + 0,16]	Rondeaux et al. (1996)
Modified Simple Ratio	MSR	MSR _j = $\frac{(R_{NIR}/R_{red} - 1)}{(R_{NIR}/R_{red})^{0.5} + 1}$	Chen (1996)
SAVI Otimizado	TSAVI	TSAVI = $\frac{[a(NIR - aVIS - b)]}{[(VIS + a(NIR - b) + 0,08(1 + a^2))]}$	Leprieur et al., (1996)
Gitelson and Merzlyak	GM	GM ₁ = (R ₇₅₀ /R ₅₅₀) GM ₂ = (R ₇₅₀ /R ₇₀₀)	Gitelson and Merzlyak (1997)
Índice de Vegetação Melhorado (Enhanced Vegetation Index)	EVI	EVI = G $\frac{N - R}{N + C_1R - C_2B + L}$ onde: N, R e B = reflectância do infravermelho próximo, vermelho e azul; C ₁ = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho - 6; C ₂ = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no azul =7,5; L = fator de ajuste para o solo = 1 G = fator de ganho = 2,5	Huete et al., 1997
Índice Amarelo	YI	YI = [R _(γ-1) - 2R _(γ0) + R _(γ+1)]/Δγ ² onde: R _(γ-1) = reflectância do comprimento da onda (0,580 μm) localizado abaixo do central γ ₀ 2R _(γ0) = reflectância do comprimento da onda central γ ₀ R _(γ+1) = reflectância do comprimento da onda (0,668 μm) localizado abaixo do central γ ₀ Δγ ₀ = distância do comprimento da onda espectral	Adams et al., (1999)
Triangular Vegetation Index	TVI	TVI = 0,5[120(R ₇₅₀ - R ₅₅₀) - 200(R ₆₇₀ - R ₅₅₀)]	Broge and Leblanc (2000)
Modified Cab Absorption in Reflectance Index	MCAR I	MCARI = [(R ₇₀₀ - R ₆₇₀) - 0,2((R ₇₀₀ - R ₅₅₀)] (R ₇₀₀ /R ₆₇₀)] ICO ₂ = (R _{2,037} - R _{2,007})	Daughtry et al. (2000)
Curvature Index	CURV	CURV = (R ₆₇₅ *R ₆₉₀)/R ₆₈₃ ²	Zarco-Tejada et al. (2000)
Flux de CO₂	CO ₂ flux	CO ₂ flux = NDVI*sPRI onde:	Rahman et al. (2000)

Índice	Sigla	Equação	Referência
		$sPRI = (PRI + 1)/2$	
<i>Zarco and Miller</i>	ZM	$ZM = (R_{750}/R_{710})$	Zarco-Tejada et al. (2001)
Índice de vegetação livre de aerossol (<i>Aerosol free vegetation index</i>)	AFRI	$AFRI_{1.6} = (\rho_{NIR} - 0.66\rho_{1.6})/(\rho_{NIR} + 0.66\rho_{1.6})$ $AFRI_{1.1} = (\rho_{NIR} - 0.5\rho_{2.1})/(\rho_{NIR} + 0.5\rho_{2.1})$	Karnieli et al., (2001)
<i>Temperature-Vegetation Dryness Index</i>	TVDI	$TVDI = \frac{(T_s - T_{(s\ min)})}{(a + bNDVI - T_{(s\ min)})}$ onde: $T_{s\ min}$ = temperatura da superfície mínima no triângulo, definindo a extremidade molhada T_s = superfície observada temperatura ao dado pixel a e b = parâmetros que definem o bordo seco modelado como um f linear para de dados ($T_{s\ max} = A + bNDVI$), $T_{s\ max}$ = superfície máxima observação de temperatura para uma dada NDVI	Sandholt et al., (2002)
<i>Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index</i>	TCARI	$TCARI = 3[(R_{700} - R_{670}) - 0,2((R_{700} - R_{550})(R_{700}/R_{670})]$	Haboudane et al., (2002)
<i>Modified Triangular Vegetation Index</i>	MTVI ₁	$MTVI_1 = 1,2[1,2(R_{800} - R_{550}) - 2,5(R_{670} - R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
<i>Modified Triangular Vegetation Index</i>	MTVI ₂	$MTVI_2 = \frac{1,2[1,2(R_{800} - R_{550}) - 2,5(R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5\sqrt{(R_{670} - 0,5)})}}$	Haboudane et al. (2004)
<i>Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index</i>	MCARI ₁	$MCARI_1 = 1,2[2,5(R_{800} - R_{670}) - 1,3(R_{800} - R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
<i>Terrestrial Chlorophyll Index</i>	MTCI	$MTCI = \frac{(R_{735,5} - R_{708,75})}{(R_{708,75} - R_{681,25})}$	Dash e Curran, 2004
<i>Blue/Green and Blue/Red Pigment index</i>	RGI	$RGI = (R_{690} - R_{550})$ $BGI_1 = (R_{400} - R_{550})$ $BGI_2 = (R_{450} - R_{550})$	Zarco-Tejada et al. (2005)
	BGI	$BRI_1 = (R_{400} - R_{690})$ $BRI_2 = (R_{450} - R_{690})$	
	BRI		
<i>Wide Dynamic Range Vegetation</i>	WDRVI	$WDRVI = ((a + 1) * NDVI + (a - 1))/((a - 1) * NDVI + (a + 1))$	Viña e Gitelson, 2005
Índice de Vegetação Melhorado (<i>Enhanced Vegetation Index</i>)	EVI2	$EVI_2 = 2,5 \frac{(N - R)}{N + 2,4R + 1}$	Jiang et al., 2008)

Fonte: Atualizada de Liu (2007).

Anexo B. Principais sensores hiperespectrais orbitais e aerotransportados.

Sensores Orbitais	Fabricante	Número de Bandas	Intervalo Espectral (μm)
FTHSI on MightySat II (desativado)	Air Force Research Lab (http://www.vs.afrl.af.mil) (http://www.kestrelcorp.com/msat.html)	256	0,35 – 1,05
LEWIS HSI	NASA (http://space.skyrocket.de/doc_sdat/lewis.htm)	384	0,4 – 2,5
Hyperion on EO-1 (ativo)	NASA Goddard Space Flight Center (eo1.gsfc.nasa.gov) (http://edc.usgs.gov/products/satellite/eo1.html)	242	0,4 – 2,5
Modis	NASA	36	0,4 – 14,3
CHRIS no Proba (ativo)	European Space Agency – General Support Technology Programme (http://www.chris-proba.org.uk/) (http://www.esa.int/export/esaMI/Proba_web_site/index.html)	63	0,4 – 1,05
Orbview 4 (falhou no lançamento)	GeoEye: innovative geospatial products & solutions provider. (http://www.geoeye.com/CorpSite)	200	0,45 – 2,5
ARIES-1 project (Australian Resource Information and Environment Satellite)	Auspace Limited	128	0,4 – 2,5
Sensores Aerotransportados	Fabricante	Número de Bandas	Intervalo Espectral (μm)
AAHIS (Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System)	SETS Technology	288	0,43 – 0,83
AIS-1 (Airborne Imaging Spectrometer)	US - "NASA, JPL"	128	0,90 – 2,4
AIS-2 (Airborne Imaging Spectrometer)	US - "NASA, JPL"	128	0,80 – 2,4
AISA (Airborne Imaging Spectrometer)	Spectral Imaging (http://www.specim.fi)	286	0,43 – 1,0
AISA Eagle	Spectral Imaging (http://www.specim.fi)	244	0,4 – 0,97
AISA Eaglet	Spectral Imaging (http://www.specim.fi)	200	0,4 – 1,0
AISA Hawk	Spectral Imaging (http://www.specim.fi)	320	0,97 – 2,45
AISA Dual	Spectral Imaging (http://www.specim.fi)	500	0,97 – 2,45
ASAS (Advanced solid State Array Spectroradiometer)	NASA	62	0,4 – 1,06
AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)	NASA Jet Propulsion Lab (http://www.aviris.jpl.nasa.gov)	224	0,4 – 2,5
AVNIR	OKSI	60	0,43 – 1,03
CASI 550 (Compact Airborne Spectrographic Imager)	ITRES Research Limited (http://www.itres.com)	288	0,4 – 1,0

CASI 1500 (Compact Airborne Spectrographic Imager)	ITRES Research Limited (http://www.itres.com)	288	0,4 – 1,05
CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrograph Sensor)	Science Applications Int. Corp. (SAIC)	40	0,43 – 0,86
CIS (Chinese Imaging Spectrometer)	Shanghai Institute of Technical Physics	90	0,4 – 12,5
DAIS 21115 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation (http://www.ger.com)	VIS/NIR (76) SWIR1 (64) SWIR2 (64) MIR (1) TIR (6)	VIS/NIR (0,4 – 1,0) SWIR1 (1,0 – 1,8) SWIR2 (2,0 – 2,5) MIR (3,0 – 5,0) TIR (8,7 – 12,0)
DAIS 3715 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation (http://www.ger.com)	37	0,4 – 12,0
DAIS 7915 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation (http://www.ger.com)	VIS/NIR (32) SWIR1 (8) SWIR2 (32) MIR (1) TIR (6)	VIS/NIR (0,43 – 1,05) SWIR1 (1,5 – 1,8) SWIR2 (2,0 – 2,5) MIR (3,0 – 5,0) TIR (8,7 – 12,3)
EPS-H (Environmental Protection System)	GER Corporation (http://www.ger.com)	VIS/NIR (76), SWIR1 (32), SWIR2 (32), TIR (12)	VIS/NIR (0,43 – 1,05) SWIR1 (1,5 – 1,8) SWIR2 (2,0 – 2,5) TIR (8 – 12,5)
EPS-A (Environmental Protection System)	GER Corporation (http://www.ger.com)	31	0,43 – 12,5
FTVFHSI (Fourier-Transform Visible Hyperspectral Imager)	Kestrel Corp, FIT	256	0,44 – 1,15
GERIS (Geophysical and Environmental Research Imaging Spectrometer)	GER Corp. USA	63	0,4 – 2,5
HSS (Hyperspectral Scanner System)	SIVAM (Http://www.sivam.gov.br/)	VIS (9) SWIR (11) MIR (17) TIR (13)	VIS (0,45 – 0,68) SWIR (0,71 – 1,0) MIR (1,58 – 2,37) TIR (3,1 – 12,0)
HIRIS (High Resolution Imaging Spectrometer)	NASA / EOS	192	0,4 – 2,5
HYDICE (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment)	Naval Research Lab	210	0,4 – 2,5
Hymap (Infrared Imaging Spectrometer)	Integrated Spectronics (http://www.intspec.com)	126 + 32	0,4 – 2,5 + 8 – 12,5
IISRB (Infrared Imaging Spectrometer)	Bomem	1720	3,5 – 5,0
IMSS (Image Multispectral Sensing)	Pacific Advanced Technology	320	2,0 – 5,0
IRIS (Infrared Imaging Spectroradiometer)	ERIM	256	2,0 – 15
ISM (Imaging Spectroscopic Mapper)	DESPA	128	0,8 – 3,2

PHI (Pushbroom Hyperspectral Imager)	Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences	244	0,4 – 0,85
PROBE-1	Earth Search Sciences Inc. (http://www.earthsearch.com)	128	0,4 – 2,5
MAIS (Modular Airborne Imaging Spectrometer)	Shanghai Institute of Technical Physics - SITP, China	71	4,4 – 1,18
MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)	ESA	15	0,4 – 1,0
MIDIS (Multiband Identification and Discrimination Imaging Spectroradiometer)	"Surface Optics Corp., JPL"	256	0,4 – 30
MAVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer)	Daedalus Enterprise Inc., USA	102	4,3 – 1,27
MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer)	Daedalus Enterprise Inc. - "CNR, Rome	102	0,43 – 12,7
ROSI (Reflective Optics System Imaging Spectrometer)	Germany - DLR, GKSS, MBB	128	0,4 – 8,5
SASI 600	ITRES Research Limited (http://www.itres.com)	100	0,95 – 2,45
SFSI (SWIR Full Spectrographic Imager)	Canadá – CCRS	122	1,20 – 2,40
SMIFTS (Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer)	US (Hawaii Institute of Geophysics)	75	1,0 – 5,0
SSTI HSI (Small Satellite Technology Initiative Hyperspectral Imager)	TRW Inc. – NASA	384	0,4 – 2,5
TASI 600	ITRES Research Limited (http://www.itres.com)	64	8 – 11,5
TRWIS III (TRW Imaging Spectrometer)	TRW Inc.	384	0,3 – 2,5
VIFIS (Variable Interference Filter Imaging Spectrometer)	Univ. of Dundee	60	0,4 – 0,89
VIMS-V (Visible Infrared Mapping Spectrometer)	ASI - NASA Cassini Mission	512	0,3 – 1,05
WIS (Wedge Imaging Spectrometer)	Hughes St. Barbara Research Center	170	0,4 – 2,5

Siglas:

VIS = visível

NIR= infravermelho próximo

SWIR= infravermelho de ondas curtas

TIR = Infravermelho termal

MIR= infravermelho médio

Fonte: BATISTA et al., (2007); DALPONTE et al., (2009); SCHAEPMAN, (2012); SHIPPERT, (2012).



Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências



Campus de Ji-Paraná-RO