

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/7: 1509-1521
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MODELAGENS DE SEQUESTRO FLORESTAL DE CARBONO E DOS CONTEÚDOS DE CO₂ ATMOSFÉRICO COM DADOS HYPERION EM DIFERENTES AMBIENTES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Modeling of the Forest Carbon Sink and the Atmospheric CO₂ Contents with Hyperion Data in Different Environments in the Brazilian Amazon

Suzy Cristina Pedroza da Silva¹, Gustavo Macedo de Mello Baptista¹

**Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IGD**

Campus Universitário Darcy Ribeiro, ICC - Ala Central, CEP 70.910-900, Caixa Postal 04465, Brasília/DF, Brasil
suzyycris@unb.br, gmbaptista@unb.br

*Recebido em 1 de Dezembro, 2014/ Aceito em 17 de Março, 2015
Received on December 1, 2014/ Accepted on March 17, 2015*

RESUMO

Esse estudo analisou a concentração e o fluxo de dióxido de carbono das torres micrometeorológicas pelo modelo de sequestro florestal de carbono denominado de CO₂flux, validando essa modelagem pelo índice ICO₂, em diferentes paisagens na Amazônia. No estudo foram utilizadas 21 imagens hiperespectrais, obtidas pelo sensor Hyperion/EO-1 que opera com 242 bandas espectrais nos comprimentos de onda de 0,4 a 2,5 µm, com uma resolução espacial de 30 metros. O CO₂flux mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação. Para sua determinação, a integração de dois índices de vegetação, i.e., o NDVI com o sPRI. O ICO₂ é determinado pela intensidade da feição de absorção do gás centrada em 2,0 µm. Os resultados fazem referência as relações estatísticas entre as informações obtidas com a aplicação do modelo CO₂flux e as informações de campo da concentração (ppm) e fluxo (mol.m².s⁻¹) de CO₂ e indicam 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 (mol.m².s⁻¹), enquanto que, para as análises a partir do *footprint*, melhores resultados foram verificados para a associação entre os dados espectrais e as medidas de concentração de CO₂ (ppm) no topo da torre. Como conclusão, o índice ICO₂ mostrou-se eficiente na validação do modelo de sequestro florestal de carbono para os ambientes naturais e antrópicos apresentando correlações com os dados das torres instaladas na Amazônia Brasileira.

Palavras chaves: Imagem Hiperespectral, CO₂flux, ICO₂

ABSTRACT

This study analyzed the concentration and flux of carbon dioxide of micrometeorological towers through the model of forestry carbon sink called CO₂flux and validated this modeling using the ICO₂ index in different landscapes in the Amazon. In the study, 21 hyperspectral images obtained by the Hyperion/EO-1 were used. The instrument acquires data in 242 spectral bands at wavelengths from 0.4 to 2.5 µm, with a spatial resolution of 30 meters. The CO₂flux measures the efficiency of carbon sink by the vegetation. To determine it, the integration of two vegetation indices, i.e., NDVI with sPRI. The ICO₂ is determined by the intensity of the gas absorption feature centered at 2.0 µm. The results make reference to the statistical relationships between the information obtained from the application of CO₂flux model and the

field concentration (ppm) and CO₂ flux (mol.m⁻².s⁻¹) and indicate that the CO₂ flux can be used with both concentration and stream data. The best fittings for the CO₂ flux were presented for the association with flux data (mol.m⁻².s⁻¹), while for the analyzes from the *footprint* better results were observed for the association between the spectral data and the measures of CO₂ concentration (ppm) at the top of the tower. In conclusion, the ICO₂ index was efficient to validate the model of forest carbon sink for natural and anthropic environments and was correlated with the data from the towers installed in the Brazilian Amazon.

Keywords: Hyperspectral Image, CO₂ flux, ICO₂.

1. INTRODUÇÃO

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 (ASNER *et al.*, 2004)

Há um certo consenso quanto à importância da Amazônia como referência de sumidouros de armazenamento de mais longa duração no ciclo do carbono, pois representa a maior reserva de floresta tropical, com cerca de 50% do total (D'AMELIO, 2006), armazenando, 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). 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) e Saleska *et al.* (2003) apontam que a interação biosfera-atmosfera e o 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 nas torres de fluxo na floresta amazônica.

Nesse contexto, o grande avanço nessa área foi a integração do conhecimento técnico-científico do sensoriamento remoto aplicado aos estudos da vegetação. Tal aproximação é concernente à estimativa de parâmetros biofísicos e fisiológicos da vegetação de forma não destrutiva (SOUZA, 2009). Surgiu então uma nova concepção em relação à capacidade de mensurar o fluxo de CO₂ na Amazônia, por meio do modelo de sequestro florestal de carbono, CO₂ flux (RAHMAN *et al.*, 2000), que integra o NDVI, que avalia a radiação fotossinteticamente

ativa absorvida pela vegetação verde (RAHMAN *et al.*, 2001), com o PRI, que representa o uso eficiente da luz no processo de fotossíntese (GAMON *et al.*, 1997).

Atualmente, com o avanço do sensoriamento remoto caracterizado pelos sensores hiperespectrais e novas técnicas de processamento de imagens, é possível analisar melhor os alvos de superfície, por meio de suas curvas espectrais discretizadas pixel a pixel obtidas ao longo do espectro óptico refletido. Nesse contexto, o sensor Hyperion integra parte do programa de tecnologias revolucionárias da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Ele opera a bordo da plataforma experimental da NASA "Earth Observing-1" (EO-1), que foi lançada em 21 de novembro de 2000. O sensor Hyperion fornece dados no intervalo espectral entre 0,4 e 2,5 μm, com resolução espacial de 30 m e faixa de imageamento de 7,5 km por 100 km (PEARLMAN *et al.*, 2001).

Apesar de o sensor Hyperion apresentar baixa relação sinal-ruído (GALVÃO *et al.*, 2013), ele obtém espectros contíguos de radiação que apresentam as principais feições decorrentes do processo fotossintético, na região do visível/infravermelho próximo, bem como as bandas de absorção dos principais gases atmosféricos de efeito estufa, tais como o vapor d'água e o dióxido de carbono, sendo este último com feições centradas à 2,0 μm, no infravermelho de ondas curtas (BAPTISTA, 2004). Por meio da medição da profundidade das feições é possível correlacionar tanto o sequestro florestal de carbono quanto o conteúdo de CO₂ atmosférico na coluna de ar adjacente aos alvos (PEDROZA DA SILVA e BAPTISTA, 2013).

Assim, esse estudo objetivou analisar a concentração e o fluxo de dióxido de carbono das torres micrometeorológicas, pelo CO₂ flux, que mede a eficiência do sequestro de carbono

pela vegetação, bem como validar a modelagem do sequestro florestal de carbono pelo índice ICO₂, que determina o conteúdo de CO₂ no ar atmosférico em diferentes paisagens da Amazônia Brasileira, a partir do sensor Hyperion.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para execução desse estudo foram realizadas etapas de processamento de dados obtidos em campo, por meio das torres micrometeorológicas do projeto LBA, bem como etapas de pré e processamento de dados Hyperion.

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em cinco torres micrometeorológicas (K34, K83, K67, FNS e SIN) do Programa LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), em diferentes ambientes (naturais e antrópicos) na Amazônia Brasileira (Figura 1).

A torre K34 localiza-se nas proximidades da cidade de Manaus, na Reserva Biológica do Cuieiras que possui cerca de 22.735

há, que pertence ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). As torres (K83 e K67) se localizam na Floresta Nacional do Tapajós, em Santarém (PA) foram instaladas a aproximadamente 5 e 6 km, respectivamente de distância, em linha reta da rodovia. 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. Finalmente, a torre denominada de SIN está localizada a aproximadamente 50 km NE de Sinop (MT) numa área caracterizada por uma Floresta de Transição Amazônia Cerrado.

Neste estudo, foram utilizadas 21 imagens (Tabela 1) hiperespectrais do sensor Hyperion obtidas entre os anos de 2001 a 2005. Para as áreas naturais com florestas primárias K34 e K67 foram obtidas 05 cenas para cada torre e, apenas uma cena para a torre SIN (Floresta de Transição Amazônia-Cerrado). Para as áreas antrópicas foram utilizadas 02 cenas da torre FNS (pastagem) e 08 cenas da torre K83 (exploração seletiva de madeira).

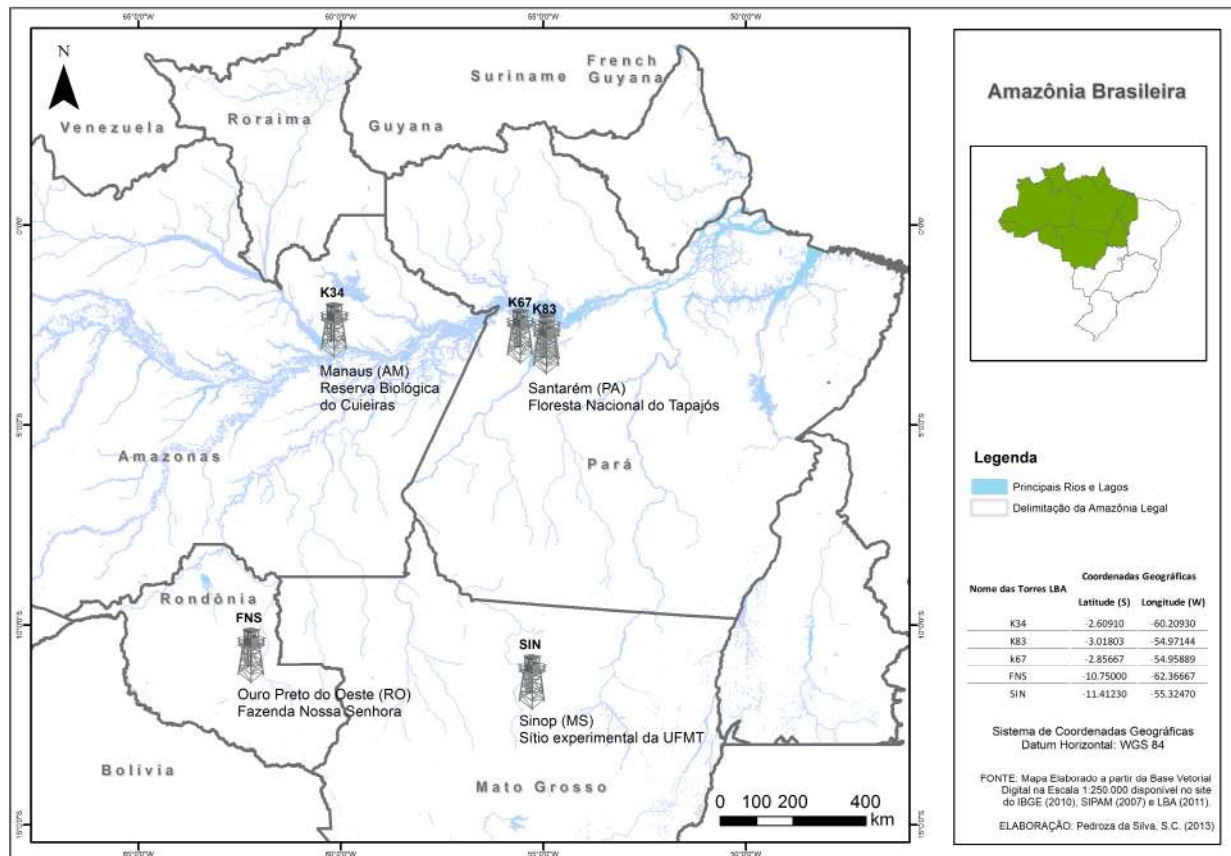


Fig. 1 - Áreas de estudo e localização das torres micrometeorológicas instaladas na Amazônia Brasileira.

Tabela 1: Datas das Cenas Hyperion Utilizadas

Torres LBA	Data
K34	07/08/2002
	14/08/2002
	11/11/2002
	23/06/2003
	06/08/2005
K83	30/07/2001
	15/08/2001
	03/11/2001
	08/07/2002
	09/08/2002
	17/05/2003
	04/07/2003
	21/08/2003
K67	08/07/2002
	26/09/2002
	12/10/2002
	21/08/2003
	25/07/2005
FNS	08/08/2003
	24/08/2003
SIN	10/07/2002

2.2 Pré-Processamento das Imagens Hyperion

A determinação do CO₂flux e ICO₂ nas imagens do Hyperion foi realizada de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 2.

Para o georreferenciamento das cenas foram utilizados os coeficientes da função de mapeamento polinomial de primeira ordem, tendo como referência a imagem de nível 1Gst *Geotiff United States Geological Survey* (USGS) referentes às localizações de cada torre.

Depois, adotou-se o reescalonamento dos valores ND (Número Digital) das imagens de nível 1R para a radiância absoluta. Para tal e para a extração da informação referente ao CO₂flux, utilizou-se as bandas radiometricamente calibradas no VNIR (8-55), que foram multiplicadas por 40. Para a determinação do ICO₂, utilizou-se as do SWIR (79-224) multiplicadas por 80 (EO-1 USER GUIDE, 2003), a partir do módulo *Basic Tools – Band Math*, disponível no software ENVI.

A correção atmosférica foi realizada utilizando o aplicativo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral*

Hypercubes). Os parâmetros do modelo incluíram uma atmosfera tropical com um modelo de aerossol rural, visibilidade inicial de 40 km, altitude do sensor de 705 km, com concentração média de CO₂ na atmosfera de 390 ppm. Os dados de latitude e longitude, hora de obtenção da imagem e as altitudes do terreno foram verificadas a partir de cada sítio experimental.

Uma das tarefas fundamentais na exploração de dados hiperespectrais é encontrar os espectros dos pixels puros de determinados alvos. Esse objetivo pode ser alcançado utilizando a transformação por *Minimum Noise Fraction* (MNF), o processamento adotado para redução da dimensionalidade dos dados, além da minimização dos ruídos muito comuns nesse tipo de dado de baixa relação sinal-ruído (AHMAD, 2012). 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. Assim, para a correta determinação do CO₂flux, foi aplicado a técnica de MNF nas bandas de 8 a 55 e para o cálculo de ICO₂, nas bandas de 79 a 224.

2.3 Determinação do CO₂flux e ICO₂

O índice CO₂flux mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação (RAHMAN *et al.*, 2000). Para sua determinação é utilizada a integração do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) com o sPRI (*Photochemical Reflectance Index*, reescalonado para valores positivos). O NDVI (Equação 1), desenvolvido por Rouse *et al.* (1973), 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), ajustado para os dados Hyperion.

$$NDVI = \frac{R_{0,800} - R_{0,660}}{R_{0,800} + R_{0,660}} \quad (1)$$

R é o valor de reflectância em cada comprimento de onda.

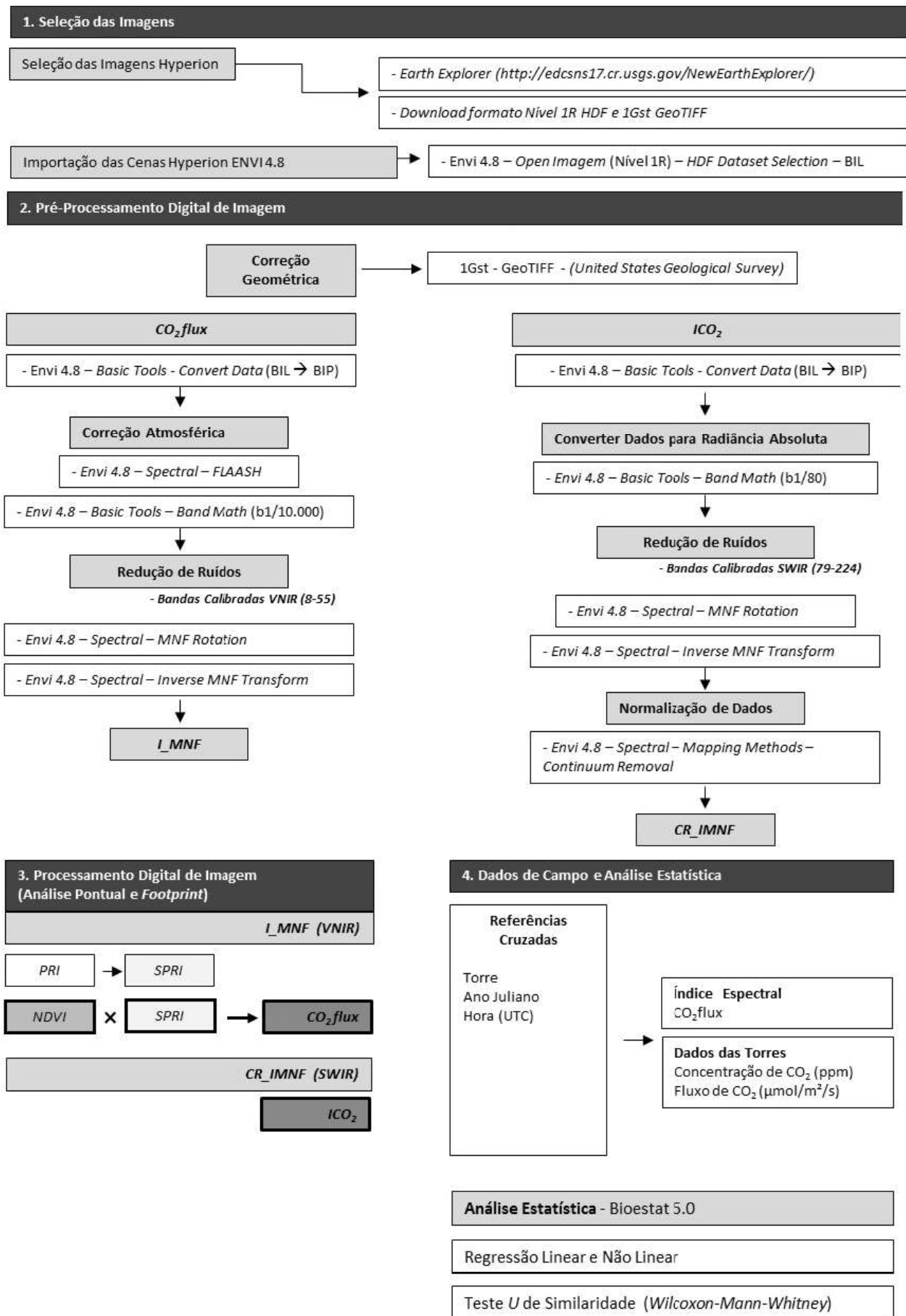


Fig. 2 - Fluxograma de processamento.

O PRI (Equação 2) é a razão da diferença existente entre a feição de absorção na transição do azul para o verde (0,531 μm) e o pico de reflectância do verde (0,57 μm). Ele pode ser correlacionado com a eficiência da luz na fotossíntese (GAMON *et al.*, 1997).

$$PRI = \frac{R_{0,531} - R_{0,57}}{R_{0,531} + R_{0,57}} \quad (2)$$

R é o valor de reflectância em cada comprimento de onda.

Entretanto, o PRI precisa de um reescalonamento de seus valores evitando dados negativos, sendo denominado nesta forma de sPRI (equação 3). O reescalonamento para valores positivos é necessário para normalizar os dados de “verdor” da vegetação.

$$sPRI = (PRI + 1)/2 \quad (3)$$

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

Para validação do modelo de sequestro florestal de carbono, utilizou-se o índice de determinação do conteúdo de CO_2 no ar atmosférico nos alvos adjacentes às torres micrometeorológicas (ICO_2), desenvolvido por Baptista (2004).

O ICO_2 é determinado pela intensidade da feição de absorção do gás centrada em 2,0 μm , por meio da subtração do ponto de máxima radiância de 2,032 μm e do ponto de mínima de radiância de 2,002 μm , valores adaptados para as bandas do Hyperion.

Tanto para a modelagem com CO_2flux , quanto para o índice ICO_2 , foram analisados a partir de mensurações pontuais de 1 pixel, referente as coordenadas das torres e espacial pelo *footprint* da área de influência das torres.

A análise espacial do sequestro florestal de carbono foi verificada a partir do *footprint* e frequência de direção dos ventos mensurados nas torres micrometeorológicas. O *footprint* determina as áreas de maior influência sobre as concentrações ou fluxos de constituintes atmosféricos em um determinado local.

O *footprint* descreve a relação entre a

distribuição espacial e o sinal fonte/sumidouro do fluxo e concentração dos gases traço. É definido pelo campo de visada do sensor que reflete sua influência sobre a superfície (SHUEPP *et al.*, 1990).

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

A direção predominante dos ventos para a torre K34 no período analisado foi a sudeste (SE); para a torre FNS foi sudoeste (SW); para as torres K83 e K67, a direção foi a nordeste (NE) com variação também para sudoeste (SW).

A média de distribuição de frequência de direção dos ventos foi calculado para os períodos diurnos, que correspondem ao fotoperíodo, nos dias julianos das 20 imagens Hyperion (Figura 3).

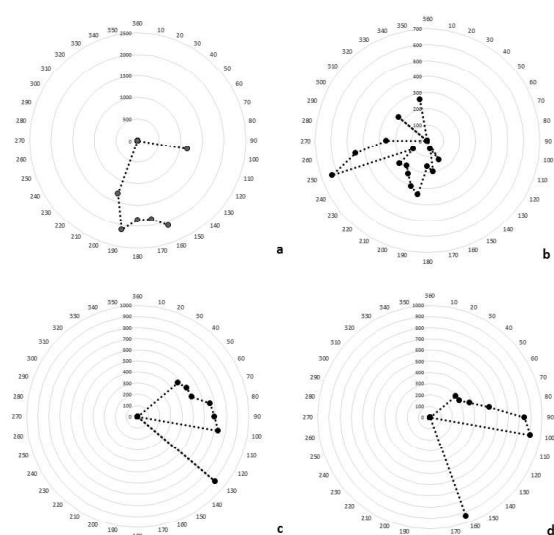


Fig. 3 - Frequência da distribuição do vento e percurso do fluxo (m) para: a) torre K34, b) torre FNS, c) torre K83 e d) torre K67.

Uma vez examinada a frequência de direção dos ventos e o percurso do fluxo (m), os pontos foram plotados por meio de um

Sistema de Informações Geográficas, que utiliza as coordenadas geográficas das torres como referência e uma imagem Hyperion georreferenciada.

Os pontos indicam as distâncias horizontais representando uma contribuição acumulada de 80% aos fluxos medidos. A partir da plotagem dos pontos foram criados os polígonos, que delimitaram a área de influência ou o *footprint* da torre (Figura 4).

No *software* ENVI, o *footprint* de cada torre foi importado pelo *Open Vector File* e a média dos pixels e a área de influência (ha) foram determinados pelo ROI (*Region Of Interest*). Esse procedimento foi realizado para as quatro torres micrometeorológicas e aplicado a todas as cenas.

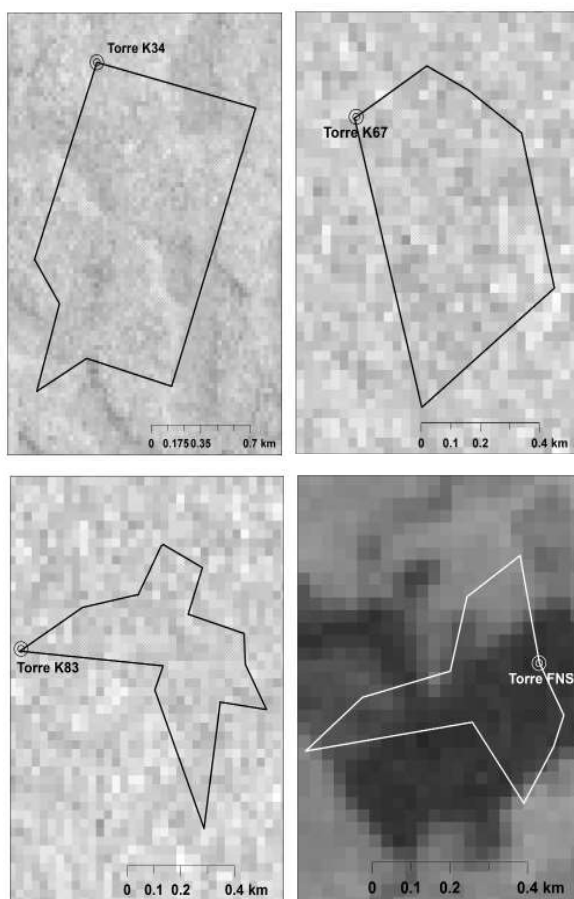


Fig. 4 - *Footprint* das torres K34, K83, K67 e FNS.

2.4 Aquisição dos Dados Micrometeorológicos

Os sítios experimentais das torres de fluxo utilizam o sistema *Eddy Covariance* para medir as trocas de CO₂ e a atmosfera. As medidas são feitas por um analisador de gás infravermelho,

comumente conhecido como IRGA (*InfraRed Gas Analyzers*). O analisador de gás de caminho aberto modelo (LI-6262/LI-7000/LI-7500, LICOR, Lincoln, NE, USA) é um instrumento utilizado para realizar medidas simultâneas das concentrações de CO₂ e vapor d'água na atmosfera, padronizados para cada 30 minutos. As visitas às torres foram realizadas entre os meses de agosto a outubro de 2013 e os dados de campo foram adquiridos durante o período de 2000 a 2005 e solicitados junto aos escritórios locais do Programa LBA. Os dados também podem ser acessados pelo site fluxnet.ornl.gov.

Nessa análise foram utilizados os dados de concentração (ppm) e de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados de forma separada, enfatizando primeiro os obtidos para o pixel correspondente à localização das torres e posteriormente ao *footprint*, ou a área de influência das torres.

3.1 Análise pontual do sequestro florestal de carbono com CO₂ flux

O CO₂ flux mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação. Para Baptista (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 sequestro florestal de carbono foi analisado pelo índice CO₂ flux, a partir dos dados de 1 pixel, correspondente a localização das torres micrometeorológicas, além do fator de tendência temporal de flutuação dos dados entre 1 e 2 horas, visando refinar as análises estatísticas (Figura 5).

A análise de regressão das variáveis ajustou o modelo CO₂ flux a uma função não-linear com distribuição polinomial. De acordo com os resultados analisados, o CO₂ flux se relacionou estatisticamente com as medidas de concentração (ppm) de CO₂ verificada pelos ajustamentos com coeficientes de determinação (R^2) de 0,62 (Figura 6a). Contudo, o ajuste do modelo CO₂ flux com os dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) apresentou ajustamento melhor com R^2 de 0,87. Em ambos os casos, foram usadas observações com médias a cada 2 horas (Figura 6b).

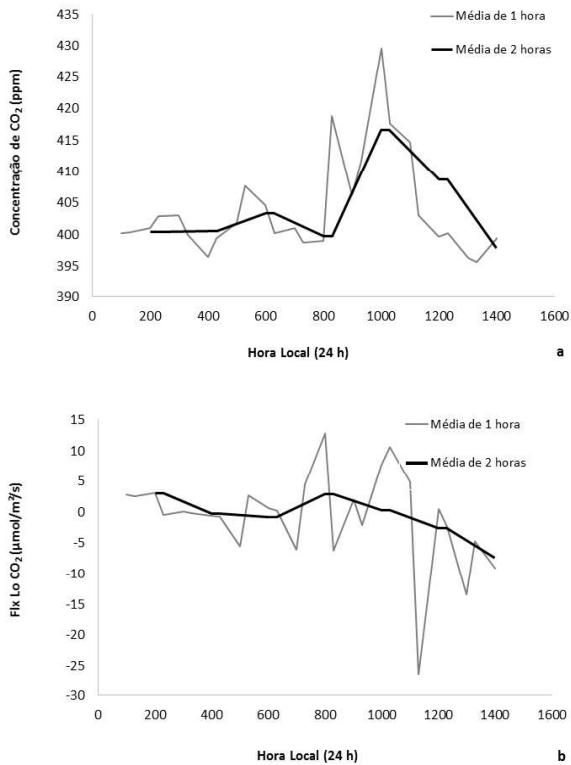


Fig. 5 - Flutuação dos dados médios de todas as torres, a cada uma e duas horas: a) concentração e b) fluxo de CO₂.

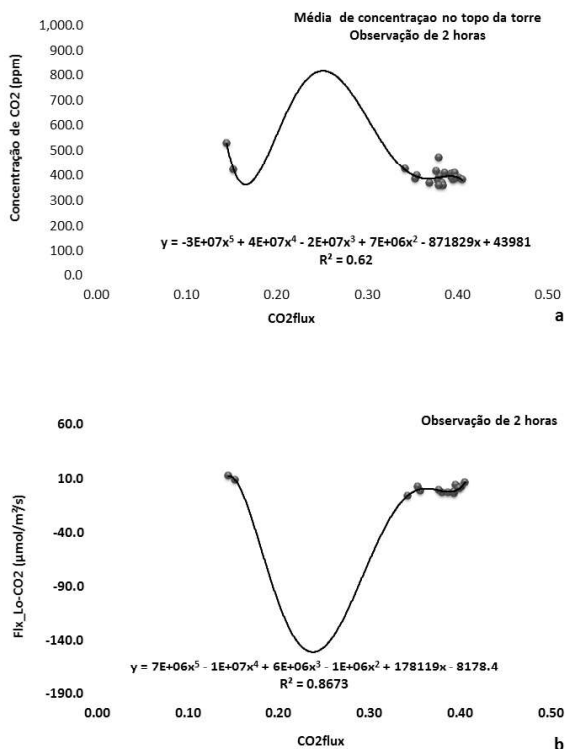


Fig. 6 - a) ajustes do CO₂flux com a concentração (ppm) nos topos das torres e b) dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹).

Pela matriz de correlação de Pearson, o CO₂flux pontual apresentou uma forte correlação de $r=-0,641$, com a concentração de CO₂ (ppm) e de $r=-0,663$, com as medidas de fluxo de CO₂ (mol.m⁻².s⁻¹). Pelo teste de hipótese, ambas as correlações são estatisticamente significativas para $\alpha=0,05$. As correlações descritas pelo coeficiente de Pearson são negativas, de grau forte entre as variáveis CO₂flux e as variáveis medidas de CO₂ nas torres micrometeorológicas.

Assim, quanto maior for 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 próximo das torres.

O modelo ajustado entre o sequestro florestal de carbono e dados de concentração de CO₂ (ppm) indica que 64% da variação observada de CO₂flux são explicados pela quantidade de CO₂ absorvido pela vegetação e a modelagem de sequestro florestal de carbono com os dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹), indica que a variação de 86% de CO₂flux são explicados pela intensidade de assimilação e emissão de CO₂ atmosférico, no momento da passagem do sensor Hyperion para ambas as análises, onde se encontravam as cinco torres micrometeorológicas.

3.2 Análise espacial (*footprint*) do sequestro florestal de carbono com CO₂flux

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 necessária para a interpretação dos resultados, especialmente quando envolvem 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. Uma das variáveis que possibilitam isso é a que determina a direção dos ventos.

A partir de mensurações da direção do vento e o percurso do fluxo foi possível calcular a área de influência (*footprint*) fonte/sumidouro do CO₂ para cada torre estudada (Tabela 2).

Os dados de *footprint* para torre K34 corroboram com os resultados analisados por Moura *et al.* (2007), que encontraram o *footprint* da mesma torre em condições estáveis, distâncias maiores que 2 km, sofrendo

Tabela 2: Área de Influência (*footprint*) das Torres Micrometeorológicas

Nome da Torre	Número de Pixels	Distâncias Máximas (m)	Área de Influência (ha)
Torre K34 (Floresta Primária)	2423	2300	207
Torre K67 (Floresta Primária)	477,4	920	42
Torre K83 (Exploração Seletiva de Madeira)	305	910	26
Torre FNS (Pastagem)	157,5	650	14

claramente contribuições das regiões de baixios.

Verificou-se na Figura 7 que o modelo CO₂flux a partir do *footprint* foi linearmente ajustado com valores de R² de 0,52 e 0,66 para observações a cada 1 e 2 horas, respectivamente.

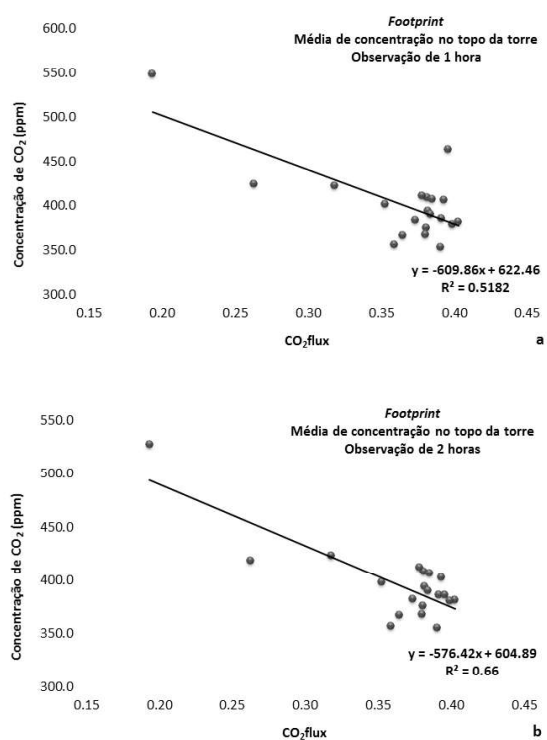


Fig. 7 - Ajustes do *footprint* ao CO₂flux com a concentração (ppm) no topo da torre: a) com observação de 1 hora e b) 2 horas.

Na modelagem de CO₂flux com dados de fluxo para observações obtidas a partir do *footprint* com médias a cada 2 horas, verifica-se que o CO₂flux apresenta ajustamento melhor

(R²=0,86), embora o ajuste se comporte como não linear (Figura 8).

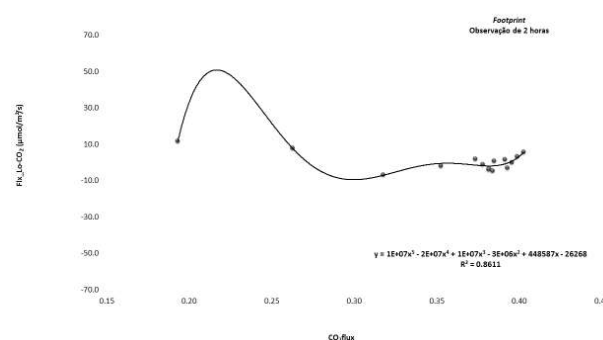


Fig. 8 - Ajustes do *footprint* ao CO₂flux com dados de fluxo com média de observações de 2 horas.

A correlação entre as variáveis do *footprint* do CO₂flux e CO₂ medidos nos topos das torres foi -0,812 e com a medição de fluxo foi -0,565. Pelo teste de hipóteses, ambas as correlações são estatisticamente significativas para α=0,05.

Os resultados encontrados mostram que o modelo CO₂flux é melhor ajustado com a associação entre a concentração de CO₂ (ppm), a partir do *footprint*.

As análises estatísticas indicaram que a associação entre o CO₂flux e os dados de concentração (ppm), trata-se de uma relação linear, indicando que 81% da variação observada de CO₂flux são explicados pela quantidade de CO₂ absorvido pela vegetação no momento da passagem do sensor Hyperion para a área de influência.

Resultados similares de sequestro florestal de carbono foram encontrados por Rahman *et al.* (2000; 2001) e Fuentes *et al.* (2006). Ambos os estudos, utilizaram dados de fluxo de torres micrometeorológicas num tipo específico de ambiente e correlacionaram essas informações com as imagens do sensor AVIRIS (*Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer*). Os autores apresentaram ajustamentos lineares com elevados valores de R² de 0,78 e 0,96, respectivamente.

A maioria das associações com dados das torres e imagens Hyperion nesse estudo foram ajustados por regressões não lineares e apresentaram valores mais baixos de correlação, quando comparados com os resultados de Rahman *et al.* (2000; 2001) e Fuentes *et al.* (2006). Esses

fatores podem ser explicados pelo fato de que os dados AVIRIS são aerotransportados e obtidos à 20 km de altitude, enquanto que os dados Hyperion são obtidos a cerca de 705 km, sendo estes, mais susceptíveis às condições atmosféricas. Outro fator pode estar relacionado à variabilidade de paisagens na região amazônica, ou seja, além das florestas primárias foram analisados ambientes de exploração seletiva de madeira e pastagens.

3.3 Similaridade pelo teste *U*

Para a verificação de similaridade estatística entre os modelos de sequestro florestal de carbono, aplicou-se o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney ou Teste *U*. Na análise estatística verificou que não há diferença entre as informações obtidas a partir do ponto e do *footprint* dos modelos extraídos das imagens 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.

3.4 Validação do CO_2 flux pelo ICO_2

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 ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), desenvolvido por Baptista (2004).

Na Figura 9, o vetor na imagem representa o *footprint* da torre FNS que é uma área recoberta por pastagem, gramíneas em crescimento que apresentam valores elevados de eficiência de sequestro de carbono (CO_2 flux) e baixas concentrações de CO_2 atmosférico (ICO_2). Dessa forma, é possível verificar que a imagem gerada pelo CO_2 flux é inversamente proporcional à imagem ICO_2 .

O ICO_2 comporta-se de forma inversa ao CO_2 flux, pois quanto maior for o sequestro florestal de carbono, menor será a concentração de CO_2 na coluna do ar atmosférico.

Baptista (2004), analisando a relação CO_2 flux e ICO_2 , 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 as imagens do AVIRIS e Hyperion.

A validação com o ICO_2 , com dados de campo relacionado a concentração de CO_2 (ppm) apresentou correlação 0,60 para uma relação não linear positiva e para os dados de fluxo ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) as melhores associações foram ajustadas tanto, com os dados no ponto (coordenadas geográficas das torres), quanto com os dados de *footprint*.

A validação pelo índice ICO_2 mostrou-se eficiente para uma regressão com correlação linear forte 0,70 para a análise pontual e correlação moderada 0,51 para uma análise espacial a partir do *footprint* das torres com os dados de fluxo. Ambas as associações foram positivas (Tabela 3).

Se o ICO_2 se comporta inversamente proporcional ao CO_2 flux, então, é possível esperar que, durante a fase clara da fotossíntese, os valores de pixels do ICO_2 sejam menores, do que os valores de pixels de CO_2 flux no momento da passagem do sensor Hyperion pela região estudada. Isto ocorre uma vez que, no ICO_2 , os valores mais próximos de zero indicam menor conteúdo de CO_2 na coluna do ar atmosférico.

Assim, verificou-se pela análise estatística que o sequestro florestal de carbono pela análise pontual, nos ambientes naturais e antrópicos, absorve maior quantidade de CO_2 explicados com 64% (concentração) e 66% (fluxo) pelo processo de fotossíntese, ao mesmo tempo que, a variação de CO_2 na atmosfera apresentou valores mais baixos em torno de 60% (concentração) e 52% (fluxo) verificados pelo ICO_2 , quando comparados aos valores de CO_2 flux. Para análise espacial – *footprint*, o desempenho do CO_2 ocorreu de forma similar para todas as torres utilizadas (Tabela 4).

Pedroza da Silva e Baptista (2013) analisaram a relação do CO_2 flux e ICO_2 numa floresta primária na Floresta Nacional do Tapajós (PA) e encontraram uma regressão linear negativa com R^2 de 0,84, indicando uma efetiva validação do modelo CO_2 flux com dados Hyperion.

Dessa forma, observa-se que os dados das análises espectrais por meio do sensor Hyperion apresentam comportamento análogo ao comportamento de CO_2 obtido em campo. Durante o dia, a concentração (ppm) é baixa e o fluxo ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) de CO_2 tende a ser negativo.

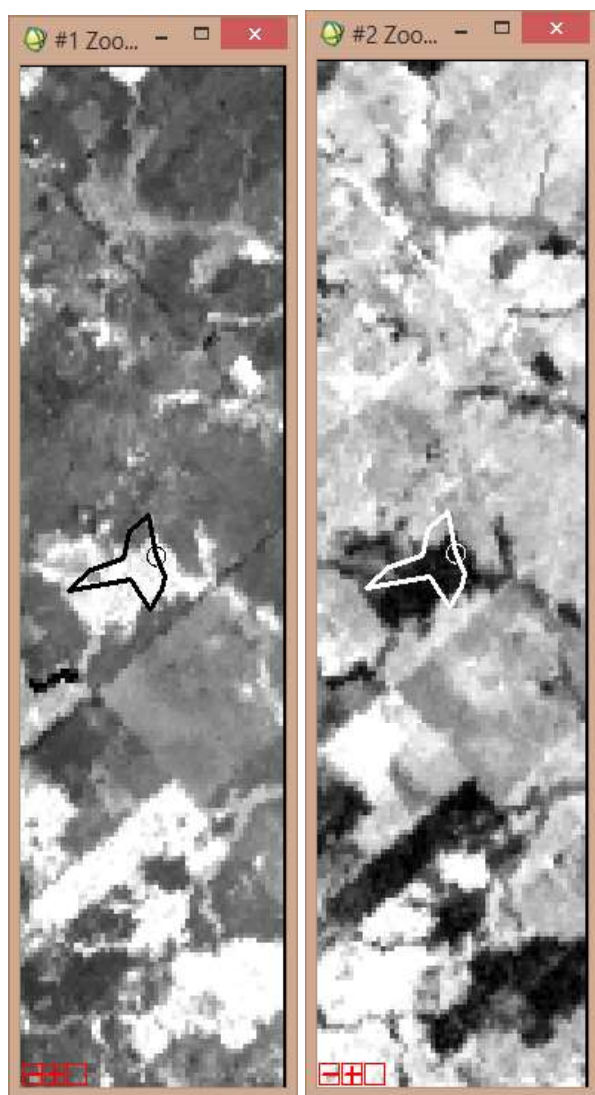


Fig. 9 - Cena de uma imagem Hyperion da Torre FNS: a) Imagem CO₂flux e b) imagem ICO₂.

Tabela 3: Matriz de Correlação Canônica para os Dados de ICO₂

Validação do ICO ₂ Correlação Canônica	ICO ₂ (Pontual)	ICO ₂ (Footprint)
ICO ₂ (Pontual)	1,00	---
ICO ₂ (Footprint)	---	1,00
Concentração CO ₂ (ppm)	0,609 (ρ < 0.01)	0,254 ns*
Fluxo de CO ₂ (mol.m ⁻² .s ⁻¹)	0,717 (ρ < 0.01)	0,496 ns*

*ns – não significativo

Tabela 4: Validação do Modelo de Sequestro Florestal de Carbono pelo ICO₂

Análise de Correlação	CO ₂ obtidos em Campo	Modelos Espectrais	Validação do Modelo pela Variação (%) de CO ₂ nos Ambientes
Análise Pontual 21 cenas	Concentração	CO ₂ flux	64,0
		ICO ₂	60,0
	Fluxo	CO ₂ flux	66,0
		ICO ₂	52,0
Análise Espacial – Footprint 20 cenas	Concentração	CO ₂ flux	81,0
		ICO ₂	27,0
	Fluxo	CO ₂ flux	56,0
		ICO ₂	50,0

Pelas análises espectrais, compreendido pelas correlações negativas, infere-se que, o aumento na absorção de CO₂ verificado na modelagem, diminui a concentração e o fluxo de CO₂ na atmosfera obtidos em campo. Entretanto, as correlações do ICO₂ foram positivas indicando que, quando se verifica o aumento do conteúdo de CO₂ na coluna atmosférica, se verifica também em campo, o aumento da concentração e fluxo de CO₂.

4. CONCLUSÕES

A modelagem do sequestro florestal de carbono (CO₂flux) com dados Hyperion para os ambientes naturais e antrópicos na Amazônia Brasileira 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 (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 na Amazônia.

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. O ICO₂ está relacionado com o aumento do conteúdo de CO₂ na coluna atmosférica, em que se verifica também, o aumento da concentração e fluxo de CO₂ na atmosfera obtidos em campo.

Uma das grandes perspectivas futuras para a investigação da concentração, como do fluxo de CO₂ será o sistema HypIRI que será colocado em órbita em 2016 e contará com um sistema hiperespectral baseado na experiência do *Jet Propulsion Laboratory* com o AVIRIS, sistema sensor de alta relação sinal-ruído, para monitoramento de larga escala e com recobrimento quase total do planeta a cada 19 dias. Os grandes desafios ainda residem na validação de campo, pois nem todos os ecossistemas apresentam dados como a

Amazônia.

Com isso, 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.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), instituição financiadora dessa pesquisa. Ao Instituto de Geociências – Universidade de Brasília, pela utilização para processamento e análises espectrais das imagens de satélite, ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), à Universidade Federal de Rondônia (UNIR) – Campus Ji-Paraná e ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) pelo apoio em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 (PNAS)** 101 (16), 6039–6044pp., 2004.

AHMAD, F. Pixel Purity Index Algorithm and n-Dimensional Visualization for ETM+ Image Analysis: A Case of District Vehari. **Global Journal of Human Social Science**, 12 (15), 23-32pp., 2012.

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**, 29 (2), 189-202pp., 2004.

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

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**, 103 (3), 312 – 323pp., 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**, 21 (3b), 291-300pp., 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, 291–300pp., 2013.

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”. **Oecologia**, 112, 492-501pp., 1997.

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

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends in Ecology and Evolution**, 15, 332-337pp., 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**, 103, 31.593-31.612pp., 1998.

MOURA, V.; VON RANDOW, C.; MANZI, A. O. Estimativa do footprint de torres em área de platô e baixio na Reserva Cuieiras, Amazônia Central. **Ciência e Natura**, v. Especi, 242-246pp, 2007.

PEARLMAN, J.; CARMAN, S.; SEGAL, C.; JARECKE, P.; BARRY, P.; BROWNE, W. Overview of the Hyperion Imaging Spectrometer for the NASA EO-1 mission. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, IEEE 2001 International, 2001. **Anais**, 7, 3036-3038pp., 2001.

PEDROZA DA SILVA, S. C.; BAPTISTA, G. M. M. Variações na Modelagem do Sequestro

- Florestal de Carbono por meio de Dados Hiperspectrais 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**, 9020-9027pp., 2013.
- PEREIRA, O.A. **Determinação do fluxo de CO₂ numa área monodominante de cambará no norte do pantanal mato-grossense**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Mato Grosso -Instituto De Física, Cuiabá, MT, 2009. 75p.
- 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**, 106. (D24), 33579-33591pp., 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**, 2000. 8p.
- 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**, 309-317pp., 1973.
- SALESKA S.R., S.D. MILLER, D.M. MATROSS, M.L. GOULDEN, S.C. WOFSY.; 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, 1554-1557pp., 2003.
- SCHUEPP, P.H., LECLERC, M.Y., MACPHERSON, J.I., DESJARDINS, R.L. *Footprint* prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. **Boundary-Layer Meteorology**, 50, 355-373pp., 1990.
- SOUZA, A. A. **Estudo de Fitofisionomias de Cerrado com Dados de Sensor Hyperion/EO-1**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2009. 120p.
- ZHAO, J.; CHEN, X.; BAO, A. M. Spatial representativeness of eddy covariance measurements using footprint analysis in arid areas. **Environmental Earth Science**, Vol. 71 (4), 2014. 1691–1697pp.