

## VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DE SEQÜESTRO DE CARBONO PARA AMBIENTES TROPICAIS DE CERRADO, POR MEIO DE DADOS AVIRIS E HYPERION.

GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA <sup>1</sup>

<sup>1</sup>UCB - Universidade Católica de Brasília  
Q.S. 07 - Lote 01 - EPCT - Águas Claras - 72030-170 - Brasília - DF, Brasil  
gustavom@ucb.br

**Abstract.** The aim of this paper is the validation of CO<sub>2</sub> flux model proposed by Rahman et al. (2000) to Cerrado tropical environment. It was used for it two AVIRIS scenes and one Hyperion scene. It was developed a spectral index for mapping the carbon dioxide contents in atmosphere, using the 2.0 µm spectral feature, and correlated with the CO<sub>2</sub> flux model. The results describes, in all cases, a negative function and presents a high correlation coefficient.

**Keywords:** spectral index, CO<sub>2</sub> flux, AVIRIS, Hyperion.

### 1. Introdução

O efeito estufa é entendido como um processo de manutenção da amplitude térmica global, por meio de bloqueio, ocasionado por gases, da radiação de ondas longas emitida pela superfície terrestre. Graças a esse processo a temperatura média do planeta mantém-se em torno de 16°C e na sua ausência essa média cairia cerca de 32°C, atingindo os 18°C negativos.

Esses gases exercem, portanto, importantes trocas energéticas atmosféricas, sendo o vapor d'água o mais importante agente de efeito estufa. Outros gases de importância radiativa são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o ozônio (O<sub>3</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (NO<sub>2</sub>). Dentre esses chamados gases de efeito estufa - GEE, o dióxido de carbono deve ser encarado como um dos principais responsáveis pelo processo.

O CO<sub>2</sub> tem sua importância não só associada ao efeito estufa, mas ao processo de fotossíntese e sua concentração tem aumentado progressivamente nos últimos anos.

Estudos recentes salientam a possibilidade da utilização do índice espectral NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para estimar o seqüestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese. Rahman et al. (2000) afirmam ser possível a determinação deste fluxo de CO<sub>2</sub> por meio da integração do NDVI com outro índice espectral, o PRI (*Photosynthetic Reflectance Index*) (Gamon et al., 1997) e sua comparação entre os resultados obtidos por meio da modelagem com os dados AVIRIS e os medidos no campo para formação boreal de coníferas, apresentou um elevado coeficiente de determinação de 0,78. Essa integração, aqui chamada de CO<sub>2</sub>flux, mede a eficiência do processo de seqüestro de carbono.

O presente trabalho visa validar a integração proposta por Rahman et al. (2000) para duas cenas AVIRIS da missão SCAR-B, de 1995, e uma cena Hyperion com diferentes extratos de vegetação dos Cerrados. Como não houve a possibilidade de determinação do fluxo de CO<sub>2</sub> no campo, no momento da obtenção das imagens, o teste baseou-se na correlação com a intensidade da feição espectral do CO<sub>2</sub> nos espectros de radiância centrada a 2,0 µm, aproximadamente, aqui chamada de ICO<sub>2</sub>.

### 2. Espectroscopia de Imageamento: AVIRIS (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer) e HYPERION

Green et al. (1998) definiram espectroscopia de imageamento como a aquisição de imagens na qual, para cada pixel, existe um espectro medido da energia eletromagnética que

chega ao sensor. Como todo pixel desse tipo de imagem apresenta um valor de radiância ou reflectância para cada uma das mais de 200 bandas, é possível obter um espectro contínuo. Esses espectros são usados para derivar informações baseadas na assinatura espectral dos alvos, que é entendida como a interação entre a matéria e a energia.

O conceito da espectroscopia de imageamento é mais bem ilustrado na **figura 1**, adaptada de Green et al. (1998).

Goetz (1992) conceituou a espectroscopia de imageamento como a aquisição simultânea de imagens num número grande de bandas espectrais contíguas e concluiu que, para analisar esses dados, são necessárias ferramentas poderosas de análise espectral. Enfatizou ainda que a quantidade de informação existente é bastante grande, o que pressupõe processamentos pesados, mas que permitem a obtenção de uma ampla gama de dados.

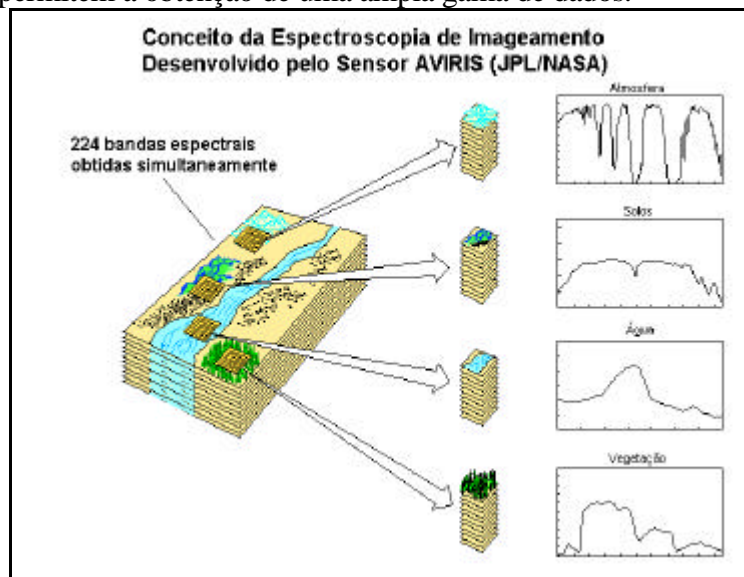


Figura 1 – Conceito de espectroscopia de imageamento. Para cada alvo componente do terreno, são obtidos espectros (modificado de Green et al., 1998).

O AVIRIS é um sistema sensor acoplado numa plataforma aerotransportada, composto por 224 bandas que recobrem o espectro refletido com 12 bits de resolução radiométrica e 20 metros de resolução espacial. Já o Hyperion é um sensor instalado no satélite EO1, que recobrindo a mesma faixa do espectro com 220 bandas de 16 bits, possui 30 metros de resolução espacial. Ambos apresentam 10 nm amplitude de bandas.

### 3. Absorção de Gases na Atmosfera

Segundo Slater (1980), a absorção é uma transformação irreversível da energia radiante em calor. A absorção atmosférica resulta em uma perda efetiva de energia para os constituintes atmosféricos. Da faixa do visível até 0,8  $\mu\text{m}$ , a absorção da atmosfera limpa é praticamente inexistente, porém, numa atmosfera turva ou mesmo poluída, as absorções passam a ser consideráveis. A absorção decorrente do ozônio é bastante forte em 0,29  $\mu\text{m}$  e o vapor d'água e o dióxido de carbono geram feições de absorção na faixa do infravermelho (Slater, 1980).

Segundo Gao et al. (1993), existem aproximadamente trinta gases na atmosfera terrestre, mas a maioria não produz feições de absorção observáveis na faixa do espectro de 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ , recoberta pelo sensor AVIRIS. Somente sete gases, o vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o ozônio ( $\text{O}_3$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o oxigênio ( $\text{O}_2$ ), produzem feições perceptíveis nessa faixa do espectro, que

influenciam muito mais dados hiperespectrais do que dados multiespectrais, como pode ser observado nos espectros de transmitância apresentados na **figura 2**.

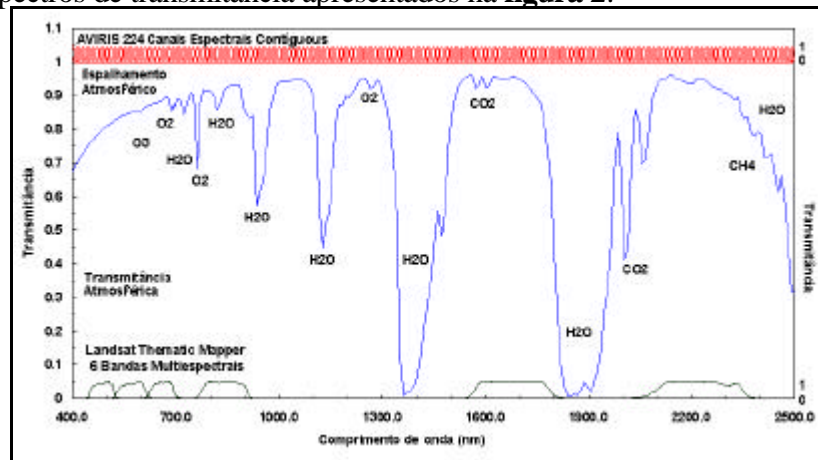


Figura 2 – Comparação dos espectros de transmitância dos gases com as bandas dos sensores AVIRIS e TM5. Adaptado de Green (2001).

Conforme se pode notar na **figura 2**, o vapor d’água apresenta várias feições intensas, e duas delas apresentam 100% de absorção; o dióxido de carbono apresenta feições intensas próximas a 2,0  $\mu\text{m}$ ; o ozônio apresenta uma feição próxima a 0,6  $\mu\text{m}$ , com um pico de absorção de aproximadamente 10%; o óxido nítrico e o monóxido de carbono apresentam feições pouco intensas entre 2,0 e 2,5  $\mu\text{m}$  com picos de absorção variando entre 1 a 2% de intensidade; o metano gera uma feição em torno de 2,35  $\mu\text{m}$  com intensidade de absorção de 20%; o oxigênio apresenta várias bandas na faixa que vai de 0,6 a 1,3  $\mu\text{m}$  (Gao et al., 1993).

As faixas do espectro que apresentam menor absorção dos gases da atmosfera são chamadas de janelas atmosféricas. Várias janelas existem na faixa coberta pelo AVIRIS e pelo Hyperion, ou seja, de 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ , como por exemplo, as faixas em torno de 0,85, 1,05 e 1,25  $\mu\text{m}$  (Gao et al., 1993).

Green (2001) identifica as feições espectrais do  $\text{CO}_2$ , nos dados AVIRIS de radiância, na faixa recoberta pelo sensor de 0,4 e 2,5  $\mu\text{m}$ , sendo a centrada a 2,0  $\mu\text{m}$  a mais significativa e mais notada na **figura 2**.

#### 4. Índices Espectrais para o Seqüestro de Carbono pela Vegetação e para os Teores de $\text{CO}_2$ Atmosférico

Segundo Rahman et al. (2000) o seqüestro de carbono pela vegetação depende a integração do NDVI e do PRI, dois índices espectrais do tipo “diferença normalizada”. O índice NDVI expressa a diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (660 nm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (800 nm). Já o PRI expressa a diferença existente entre a feição de absorção no azul (531 nm) e o pico de reflectância do verde (570 nm).

Diversos estudos recentes mostram que o índice espectral PRI pode ser correlacionado com as taxas de fotossíntese e, como citado anteriormente, o NDVI com o seqüestro de carbono. Isso é facilmente compreendido, pois quanto maior for a atividade fotossintética, maior serão as feições de absorção nas faixas do azul e do vermelho e mais expressivos serão os valores. A **figura 3** apresenta um exercício que visa mostrar essas relações de absorções e o vigor da vegetação. Para tal, utilizou-se dois espectros da biblioteca espectral do USGS (Clark et al., 1993), sendo o primeiro chamado Lawn Grass GDS91, representando o espectro da vegetação sadia e verde e o segundo, intitulado Dry Long Grass AV87-2, como amostra de vegetação seca. Os dois espectros são de gramíneas. Por meio de modelagem espectral,

criaram-se mais três espectros representando a participação de 75% de verde e 25% de seco, de 50% de cada espectro e 25% de verde e 75% de seco.

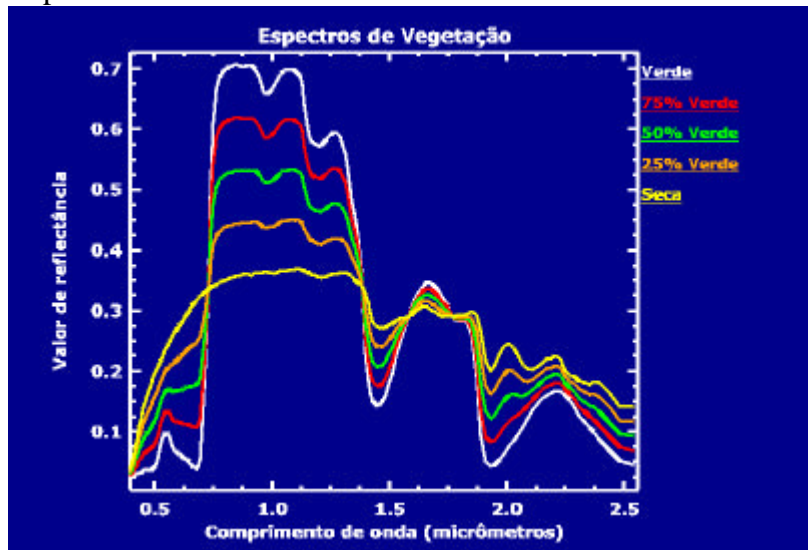


Figura 3 – Modelagem espectral utilizando-se espectros da biblioteca espectral do USGS, mostrando a mudança do comportamento da vegetação quando do processo de secagem.

Pode-se perceber que à medida que a vegetação vai secando as feições de absorção do azul e do vermelho desaparecem, o que pode ser verificado por meio dos índices espectrais NDVI e PRI.

Os índices espectrais NDVI e PRI são expressos de acordo com as equações 1 e 2, respectivamente.

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

e

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}} \quad (2)$$

onde  $R_i$  é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, em nm, de valor  $i$ .

Para a determinação do conteúdo de  $CO_2$  no ar atmosférico adotou-se um índice espectral, chamado neste artigo de  $ICO_2$ , determinando a intensidade da feição de absorção do gás centrada em  $2,0 \mu m$ , por meio da subtração do ponto de máxima, do de mínima radiância, localizados a  $2,037$  e a  $2,007 \mu m$ , respectivamente.

## 5. Metodologia

Para realização do presente estudo foram adotadas sete etapas: seleção das cenas AVIRIS e Hyperion; determinação do NDVI; determinação de PRI; reescalonamento de PRI, gerando sPRI; determinação de  $CO_{2flux}$ ; determinação de  $ICO_2$ ; e regressão linear entre  $CO_{2flux}$  e  $ICO_2$ .

Para a seleção das cenas AVIRIS e Hyperion, buscaram-se cenas que contivessem diversidade de estratos vegetais. Do sensor AVIRIS adotou-se uma cena do município de São João D'Aliança, uma do município de Niquelândia, ambas no estado de Goiás, e do Hyperion, uma dentro do Distrito Federal, conforme pode ser visto no mapa de localização das áreas (Figura 4).

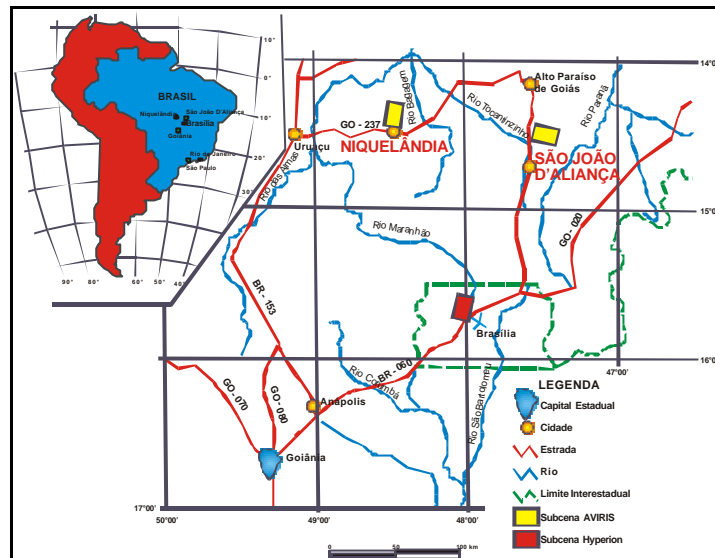


Figura 4 – Mapa de localização das áreas de estudo.

Os dados AVIRIS foram obtidos no mesmo dia com diferença de menos de ½ hora entre as aquisições, pois o vôo de Niquelândia foi precedido do de São João D'Aliança. As cenas AVIRIS adotadas neste estudo são apresentadas na **figura 5**.

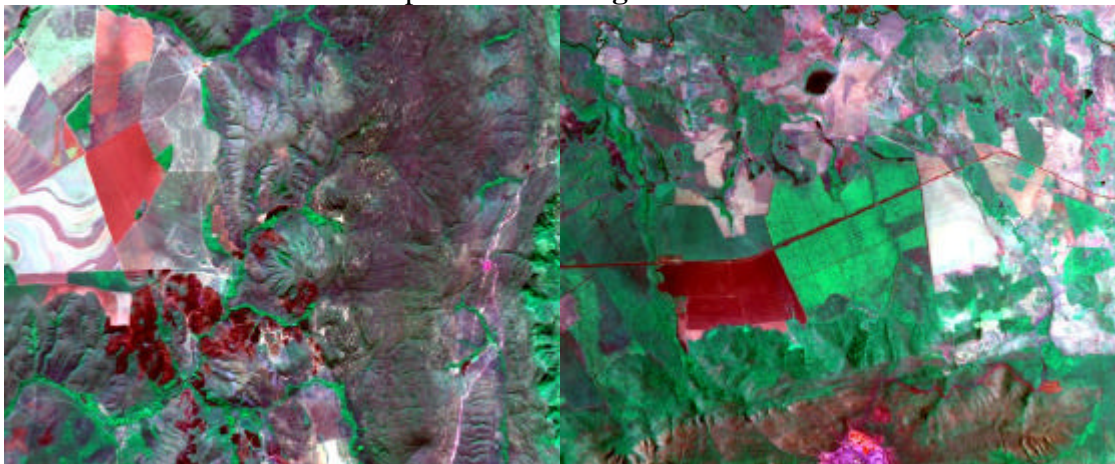


Figura 5 – Cenas AVIRIS utilizadas neste estudo. São João D'Aliança e Niquelândia, respectivamente.

Já a cena Hyperion (Figura 6) foi obtida em no início de 2001 para o projeto de pesquisa encabeçado pelo Professor Alfredo Huete, da Universidade do Arizona em Tucson, que gentilmente cedeu os dados para este trabalho. A parte selecionada apresenta o Parque Nacional de Brasília e parte de seu entorno imediato, além das cidades satélites de Ceilândia, Taguatinga, Samambaia e Recanto das Emas.



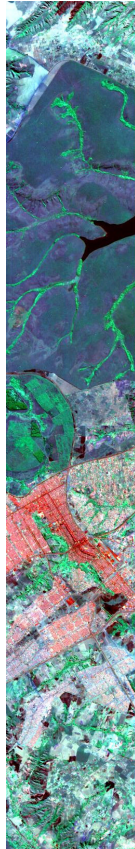


Figura 6 – Cena Hyperion utilizada.

## 6. Resultados e discussão

Os dados foram processados no software ENVI®, versão 3.2, utilizando-se o módulo *band math* e as regressões lineares foram obtidas por meio do software IDRISI 32®. As **figuras 7, 8 e 9** apresenta o resultado da integração entre NDVI e sPRI, chamada de CO<sub>2</sub>flux e da modelagem do CO<sub>2</sub> atmosférico, chamada de ICO<sub>2</sub> para todas as três cenas.

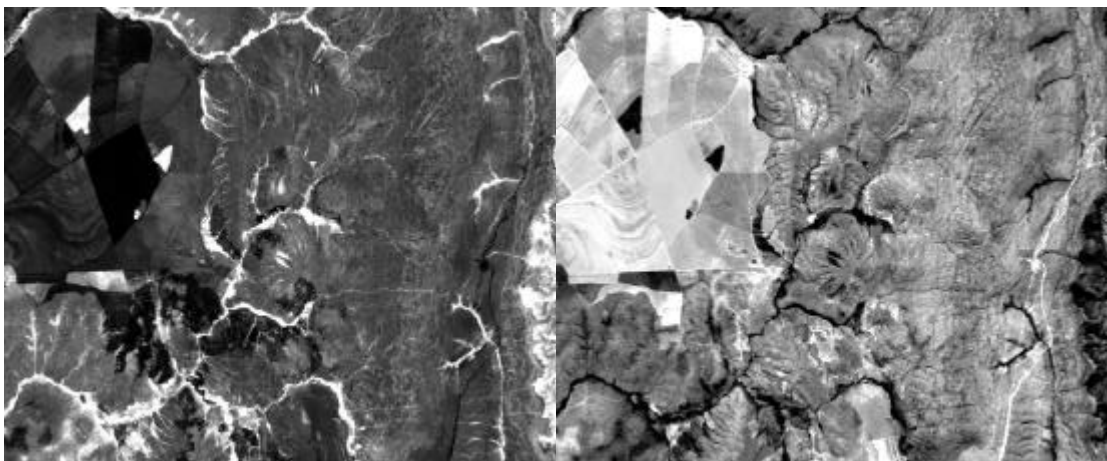


Figura 7 – CO<sub>2</sub>flux e ICO<sub>2</sub> para a cena AVIRIS de São João D'Aliança.

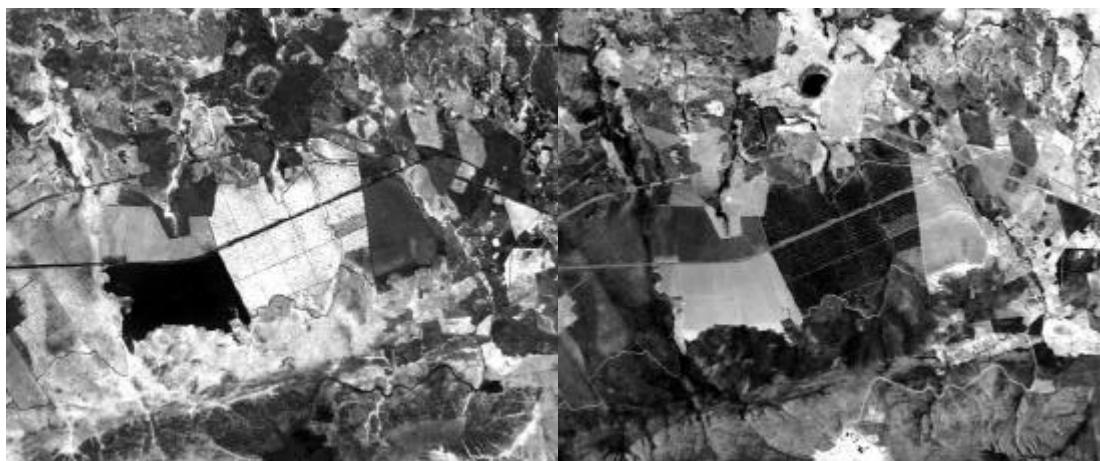


Figura 8 – CO<sub>2</sub>flux e ICO<sub>2</sub> para a cena AVIRIS de Niquelândia.



Figura 9 – CO<sub>2</sub>flux e ICO<sub>2</sub> para a cena Hyperion de Brasília.

Pode-se notar que a imagem CO<sub>2</sub>flux é o oposto da imagem ICO<sub>2</sub>. Esse resultado era previsto, pois áreas com maior densidade florestal, tais como matas ciliares, apresentam valores elevados de eficiência de seqüestro de carbono e baixos teores de CO<sub>2</sub> atmosférico. Já as áreas urbanas, como na cena Hyperion, e as de solos expostos, nas cenas AVIRIS, apresentam comportamento inverso. Esses parâmetros são inversamente proporcionais, pois quanto maior o seqüestro, menos CO<sub>2</sub> atmosférico existirá na coluna sobre o alvo. Esse fato foi comprovado por meio da regressão linear entre os resultados que descreve funções negativas e altos coeficientes de correlação (**Figura 10**).

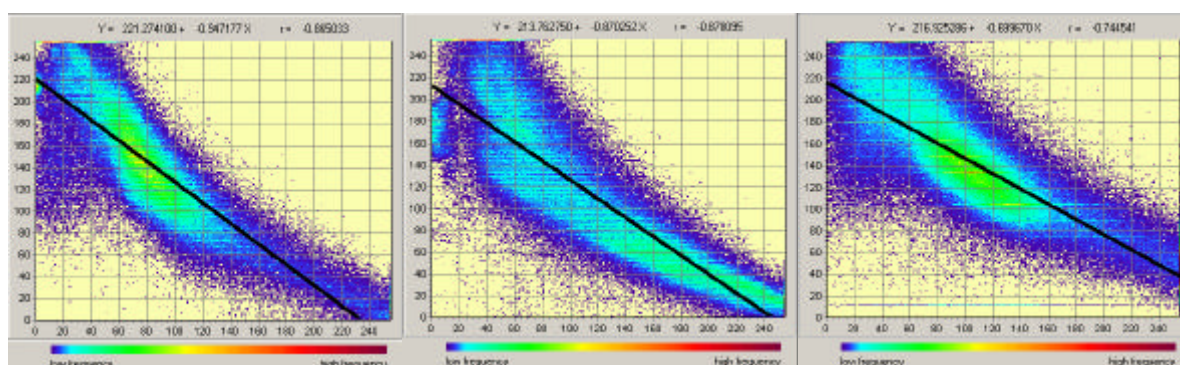


Figura 10 – Regressões lineares entre CO<sub>2</sub> flux e ICO<sub>2</sub> para São João D'Aliança, Niquelândia e Brasília, respectivamente.

## 7. Conclusão

O presente trabalho mostrou ser possível utilizar a metodologia proposta por Rahman et al. (2000) para o mapeamento do seqüestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese, por meio de dados hiperespectrais para ambientes tropicais de Cerrado. Além disso, o presente trabalho propõe a utilização de um índice para a identificação dos teores de dióxido de carbono na coluna atmosférica adjacente aos alvos.

A correlação entre o modelo proposto por Rahman et al. (2000) e o de determinação dos teores de CO<sub>2</sub> atmosférico foi elevada tanto para dados obtidos em plataformas aerotransportadas como para os de plataforma orbital. Os resultados obtidos com o Hyperion apresentaram o menor coeficiente de correlação (0,74), pois foram 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 permitem correlações superiores a 85%.

Novos estudos devem ser incentivados para melhor compreensão da relação espectral com os elementos do ciclo do carbono, visando melhorar sensivelmente a correlação entre feições de absorção decorrentes da fotossíntese e dos teores de CO<sub>2</sub> atmosférico.

## Referências

- Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Gallagher, A.; King, T.V.V.; Calvin, W.M. The U.S. Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0  $\mu$ m. *U.S.G.S. Open File Report 93-592*, 1340 pp, 1993.
- 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*, vol. 112, pp. 492-501, 1997.
- Gao, B.C.; Heidebrecht, K.B.; Goetz, A.F.H. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*. 44:165-178, 1993.
- Goetz, A.F.H. Imaging spectrometry for Earth observations. *Episodes*. 15(1):7-14, 1992.
- Green, R.O. Measuring the Spectral Expression of Carbon Dioxide in the Solar Reflected Spectrum with AVIRIS. In: AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California. 2001. Disponível em: <[http://popo.jpl.nasa.gov/docs/workshops/01\\_docs/2001Green\\_co2\\_web.pdf](http://popo.jpl.nasa.gov/docs/workshops/01_docs/2001Green_co2_web.pdf)>. Acesso em 07/06/2002.
- Green, R.O.; Eastwood, M.L.; Sarture, C.M.; Chrien, T.G.; Aronsson, M.; Chippendale, B.J.; Faust, J.A.; Pavri, B.E.; Chovit, C.J.; Solis, M.; Olah, M.R.; Williams, O. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sens. Environ.* 65:227-248, 1998.
- Rahman, A.F.; Gamon, J.A.; Fuentes, D.A.; Roberts, D.; Prentiss, D.; Qiu, H. Modeling CO<sub>2</sub> flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. *AVIRIS Workshop*, JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.
- Slater, P.N. *Remote Sensing: optics and optical systems*. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts, 1980.