

## Comparação entre as respostas espectrais dos sensores MODIS/TERRA e WFI/CBERS-2 para o monitoramento do material em suspensão na Foz do Rio Amazonas

Gustavo Souto Fontes Moller  
Milton Kampel  
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo  
Flavio Jorge Ponzoni  
Leila Maria Garcia Fonseca

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{moller, milton, evlyn, flavio}@dsr.inpe.br; leila@dpi.inpe.br

**Abstract.** Suspended sediments in coastal waters play an important role in coastal processes. They can be used to monitor pollutants, water quality and primary production. The large spatial and temporal variability of coastal environments, however, makes it difficult the acquisition of meaningful data. To overcome that problem the relationship between suspended sediment and the reflectance measured by remote sensors has been used to estimate and to map the distribution of suspended sediment over coastal waters. As a result, coastal water coverage by remote sensors has increased with new sensors as MODIS and SeaWiFS. The Wide Field of View (WFI/CBERS 2) sensor band 1 (630-690nm) also may be added as alternative data source for coastal waters even so it was not aimed to that application. In this paper, WFI/CBERS 2 data and MODIS data are compared to assess the suitability of the former for coastal studies. Preliminary results show high correlation between WFI/CBERS 2 band 1 and MODIS/TERRA band 1 (620-670nm), supporting the idea that both sensors can be used for suspended sediment monitoring in the Amazon River estuary.

**Palavras-chave:** remote sensing, suspended sediment, Amazon River, MODIS, WFI, sensoriamento remoto, sedimento em suspensão, Rio Amazonas, MODIS, WFI.

### 1. Introdução

A presença de material em suspensão em águas costeiras é um parâmetro que, em altas concentrações influencia, por meio de alterações na turbidez e no aporte de partículas orgânicas e inorgânicas (nutrientes), diversos processos na coluna d'água. Este comportamento permite que este parâmetro seja utilizado no monitoramento da qualidade da água e em estudos sobre alterações da linha de costa, da produção primária fitoplanctônica e da dispersão de poluentes (Miller e McKee, 2004). Entretanto, a concentração de materiais em suspensão em águas costeiras é altamente dinâmica dentro de pequenas escalas temporais e espaciais em razão da re-suspensão do sedimento de fundo e do fluxo dos rios (Miller e McKee, 2004). Esta alta variabilidade está relacionada, como no caso da foz do Rio Amazonas, a diversos fatores ambientais, tais como: as correntes oceânicas, os ventos, as variações da maré e do regime hidrológico do rio (Nittrouer e DeMaster, 1996).

Devido ao grande número de fatores ambientais que atuam na região da foz do Rio Amazonas, o monitoramento da concentração de materiais em suspensão usando coletas de dados *in situ* torna-se demorado, caro e muitas vezes inexato. Desta forma, o uso de dados derivados da reflectância espectral medida por sensores remotos se mostra como um método alternativo sinóptico, mais rápido e econômico de avaliar a concentração de materiais em suspensão em águas costeiras (Chen et al., 1991).

Desta forma, diversos estudos foram realizados tentando identificar a relação entre a concentração de materiais em suspensão e a reflectância medida por sensores remotos (Morel e Prieur, 1977; Curran e Novo, 1988; Novo et al., 1989; Chen et al., 1991; Chen et al., 1992). Estes estudos demonstram que a resposta espectral dos materiais em suspensão varia em

função da sua concentração, tipo, formato, composição química e mineralógica. É comprovado, também, que a presença deste material na água ocasiona um aumento da reflectância espectral em comprimentos de onda mais longos. Portanto, um método que vem apresentando significativos resultados no monitoramento de materiais em suspensão em áreas costeiras baseia-se na utilização de sensores remotos sensíveis à região de radiação vermelha (630-700 nm) do espectro eletromagnético (Froidefond et al., 2002; Miller e McKee, 2004).

Entretanto, deve-se ressaltar que as aquisições de dados por sensores orbitais estão sujeitas às influências de fatores da dinâmica superficial (deriva pelo vento) e atmosférica (nuvens e reflexão especular do Sol) os quais podem impedir a coleta sistemática de dados.

A utilização de sensores como o *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), lançado em 1997 e o *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS), lançado a bordo dos satélites TERRA em 1999 e AQUA em 2002, respectivamente, com altas resoluções temporais aumenta o número de observações em curtos períodos de tempo de uma mesma região. A passagem destes dois sensores pela mesma área num intervalo de tempo aproximado de 1-2 dias e as diferentes características de geometria de visada de ambos permite que os fatores que podem prejudicar o sinal que chega ao sensor possam ser evitados (Gregg e Woodward, 1998).

Neste contexto, a banda 1 (630-690 nm) do sensor *Wide Field Imager* (WFI) instalada a bordo do satélite CBERS-2, pode vir a complementar a cobertura de imageamento de áreas costeiras. Estudos referentes à utilização deste sensor no monitoramento de materiais em suspensão não foram realizados até o presente momento. Portanto, o presente estudo visa verificar a possibilidade de se utilizar a banda 1 do sensor WFI/CBERS-2 em conjunto com a banda 1 do sensor MODIS/TERRA no monitoramento de propriedades bio-ópticas de águas costeiras na região da foz do Rio Amazonas, costa Norte do Brasil. Para isso, adquiriram-se imagens dos sensores MODIS/TERRA e WFI/CBERS-2 para uma mesma data e uma mesma região (foz do Rio Amazonas). A partir destas imagens foram coletados perfis paralelos e perpendiculares à costa dos valores de reflectância medidos em cada sensor. Com base nos valores coletados nestes perfis testou-se a hipótese de existência de correlação significativa entre as respostas espectrais de ambos os sensores para diferentes concentrações de materiais em suspensão em áreas costeiras.

A escolha do sensor MODIS se deve ao fato de estar sendo utilizado para o monitoramento de materiais em suspensão (Esaias et al., 1998; Hu et al., 2004; Miller e McKee, 2004; Bentz et al., 2005). Apesar de diferentes resoluções radiométricas 12 *bits* (MODIS/TERRA-AQUA) e 8 *bits* (WFI/CBERS 2), estes sensores apresentam resoluções espaciais (banda 1, MODIS – 250m e WFI – 260m) e espectrais (banda 1 do MODIS entre 620-670 nm e banda 1 do WFI entre 630-690 nm) semelhantes.

## 2. Área de Estudo

A foz do Rio Amazonas (**Figura 2**) apresenta-se como uma área singular de estudo, devido a sua alta dinâmica e pelo grande volume de materiais descarregados no oceano. Este rio está inserido no maior sistema fluvial do mundo, contribuindo, com um volume de aproximadamente  $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$  de água doce e em média  $1,1$  a  $1,3 \times 10^9 \text{ ton/m}^3$  para o Atlântico Tropical a cada ano. Isto corresponde a aproximadamente 16% da descarga anual nos oceanos do mundo (Muller-Karger et al., 1988).

O material descarregado pelo Rio Amazonas pode variar em concentrações de 0,2 a 1 g/l o que apresenta uma grande influência na distribuição espacial das propriedades das águas nas regiões norte e nordeste do Brasil chegando em algumas situações a influenciar as propriedades ópticas e químicas da região do Caribe (Meade et al., 1985; Muller-Karger et al., 1988).

As marés desta região estão entre as mais intensas do mundo. Estas se movem na costa gerando fortes correntes ( $>200 \text{ cm s}^{-1}$ ) que penetram na desembocadura do rio como uma onda progressiva propagando-se estuário a dentro e alcançando até 3 metros de altura (Beardsley et al., 1995).

Existem duas principais correntes oceânicas que atuam na Plataforma Continental Amazônica e funcionam como agentes dispersores da pluma de sedimentos do Rio Amazonas. Estas correntes são: a Corrente Norte do Brasil que carrega materiais em suspensão do rio para o norte da América do Sul e Caribe, e a Contra Corrente Equatorial que transporta estes materiais para a região central do Oceano Atlântico Sul (Muller-Karger et al., 1988; Hu et al., 2004).

A maior e a menor descarga deste rio para o oceano ocorrem de Maio à Junho e Outubro à Novembro, respectivamente. A descarga de material tende a seguir a descarga de água com um atraso de dois a três meses, conforme demonstrado na **Figura 1** (Kinike et al., 1996).

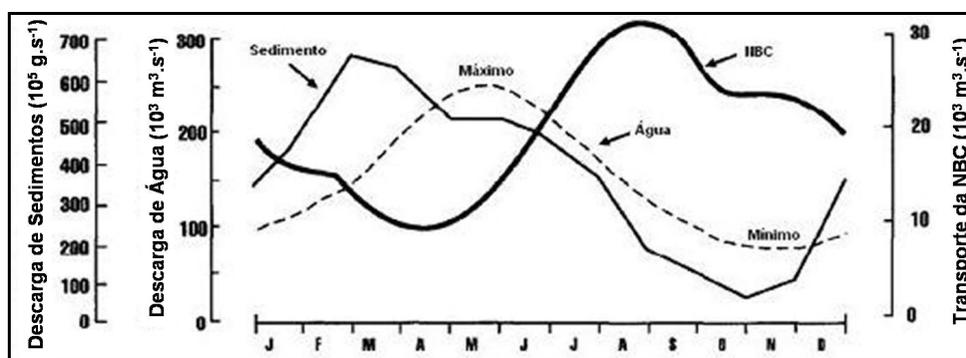


Figura 1 - Sazonalidade de importantes fatores que participam na dinâmica da Plataforma Continental Amazônica. Corrente Norte do Brasil (*North Brazi Current – NBC*).

Fonte: Adaptado de Nittrouer e DeMaster, 1996.

### 3. Materiais e Métodos

As imagens dos sensores MODIS/TERRA e WFI/CBERS-2 podem ser adquiridas sem custo através da Internet (MODIS, 2006; CBERS, 2006). As buscas por imagens podem ser realizadas a partir das coordenadas geográficas e/ou órbita/ponto da área de interesse. Em especial, no caso do satélite CBERS-2, as imagens podem ser selecionadas, também, por município e/ou estado. As imagens utilizadas neste estudo são referentes ao dia 26 de janeiro de 2004 e os horários das aquisições são: 10:43h WFI/CBERS-2 e 10:30h MODIS/TERRA. A **Tabela 1** apresenta as principais características dos sensores e das cenas utilizadas neste estudo.

Tabela 1 – Características dos sensores MODIS/TERRA e WFI/CBERS-2 e das cenas utilizadas.

Sensor	Banda 1 (nm)	Altitude do sensor (km)	Inclinação polar	Swath	Ângulo de Visada (Nadir)	Largura da area imageada (km)	Res. Radiométrica (bits)	Res. Espacial (m)	Res. Temporal (dias)
MODIS	620-670	705	98.2°	55°	0°	2330	12	250	1
WFI	630-690	778	98.5°	60°	32.62°	890	8	260	5

Fonte: MODIS (2006) e CBERS (2006).

Res. = Resolução

A imagem do sensor MODIS/TERRA foi selecionada por apresentar baixa cobertura de nuvens na área de interesse. Esta imagem foi obtida a partir de um mosaico de 4 cenas adquiridas para uma mesma data (**Tabela 2**). As cenas foram mosaicadas no aplicativo *MODIS Reprojection Tool* (MRT) da Agência Espacial Americana (NASA). As cenas MODIS/TERRA com nível de processamento L2b foram adquiridas em valores de reflectância no formato HDF (*Hierarchical Data Format*) e apresentam-se georreferenciadas.

Tabela 2 – Cenas MODIS/TERRA utilizadas no mosaico.

MOD09GQK.A2004026.h12v08.004.2004030103656.hdf
MOD09GQK.A2004026.h12v09.004.2004030061902.hdf
MOD09GQK.A2004026.h13v08.004.2004030175353.hdf
MOD09GQK.A2004026.h13v09.004.2004030104940.hdf

A imagem WFI/CBERS-2 (Órbita-163, Ponto-100) foi georreferenciada com base no mosaico de imagens MODIS/TERRA no aplicativo ENVI 4.2, apresentando um erro (RMS) de, aproximadamente, 0,4 *pixel*. Os números digitais desta imagem foram convertidos para valores de reflectância de superfície a partir do modelo de correção atmosférica 5S (Tanré et al, 1990). Pelo fato desta imagem apresentar uma série de ruídos (*stripes*) optou-se pela aplicação do filtro Mediana, no aplicativo ENVI 4.2, a fim de identificar a possibilidade dos ruídos estarem prejudicando de alguma forma a correlação com a imagem MODIS/TERRA. Este filtro suaviza os ruídos e evita que a imagem perca resolução espacial (Mather, 1999).

A forma escolhida para estabelecer as correlações entre as 3 imagens foi através de 10 perfis, sendo 6 perpendiculares e 4 paralelos à costa (**Figuras 2 a e b**).

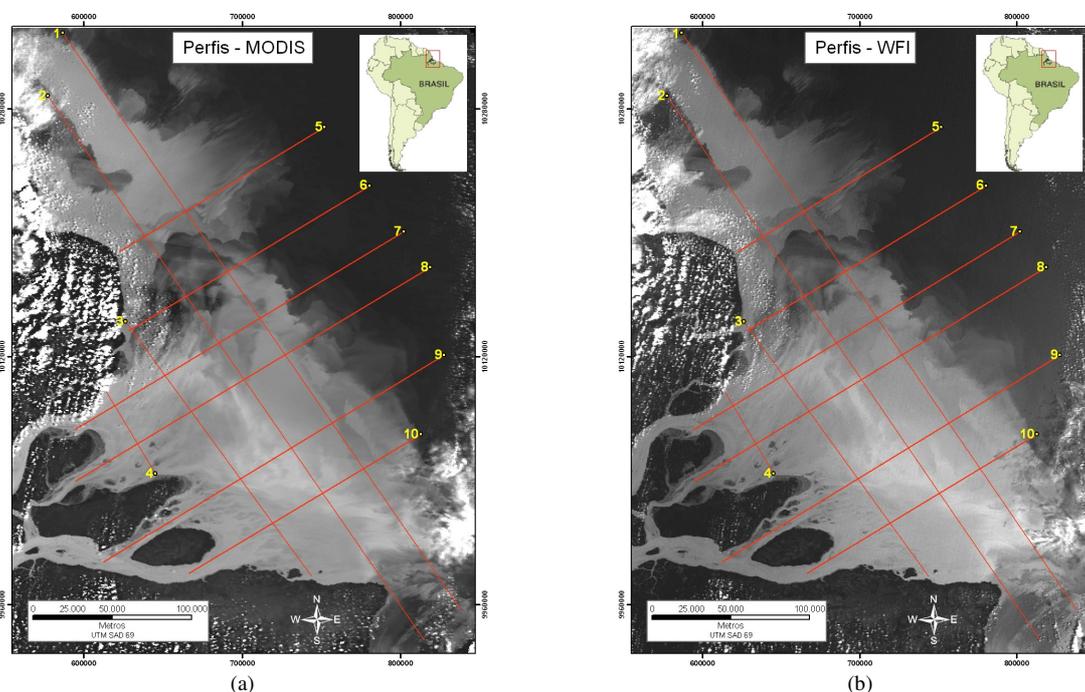


Figura 2 – Localização dos dez perfis extraídos das imagens: (a) Imagem MODIS/TERRA e (b) Imagem WFI/CBERS-2. Os números indicam a numeração adotada para os perfis e o local onde se iniciou a coleta dos valores de reflectância em cada perfil.

Foram coletados, no aplicativo ENVI 4.2, os valores de reflectância de superfície dos *pixels* no traçado de cada perfil nas 3 imagens geradas (WFI/CBERS-2, WFI com filtro mediana e MODIS/TERRA). Estes valores foram exportados em formato ASCII (*American*

Standard Code for Information Interchange) para o software STATISTICA 6.0, onde se realizaram as correlações estatísticas e geração dos gráficos. A fim de se identificar a capacidade dos sensores em resolver massas de água com características semelhantes, selecionaram-se os perfis 2 e 8 por apresentarem os maiores comprimentos e, também, porque atravessam massas de água com diferentes concentrações de materiais em suspensão.

#### 4. Resultados e Discussão

Os perfis das 3 imagens (WFI/CBERS-2, WFI com filtro mediana e MODIS/TERRA) apresentaram formas semelhantes, mas com diferenças nas respectivas amplitudes dos valores de reflectância de superfície (**Figuras 3 e 4**). As **Figuras 3 e 4** mostram que mesmo pequenas variações nas concentrações de materiais em suspensão podem gerar respostas parecidas em ambos os sensores, sendo que o sensor MODIS/TERRA, devido a sua maior resolução radiométrica, aparentemente, detecta melhor estas variações. Esta característica pode ser melhor visualizada nas janelas extraídas dos perfis à direita nas **Figuras 3 e 4**.

A diferença entre a imagem WFI/CBERS-2 com a aplicação do filtro mediana nos perfis 2 e 8 (**Figura 3 e 4**) é melhor visualizada nas janelas geradas em cada perfil, à direita. Os perfis referentes à imagem WFI/CBERS-2 com a aplicação do filtro mediana apresentaram as curvas com feições mais suaves, mantendo, contudo, as feições características às massas de água com diferentes concentrações de material em suspensão.

No início do perfil 2 (**Figura 3**) nota-se uma grande influência das nuvens nos sinais detectados por ambos os sensores. O perfil 8 (**Figura 4**), perpendicular à costa, permitiu observar a grande variabilidade na concentração de materiais em suspensão na foz do Rio Amazonas.

A análise da **Figura 4** permite constatar que mesmo quando os valores de reflectância de superfície detectados pelo sensor MODIS/TERRA são muito baixos, os valores detectados pelo sensor WFI/CBERS-2 apresentam reflectâncias próximas a 0,10, indicando que esta variação de amplitude entre os sensores pode estar relacionada com as diferentes características da geometria da aquisição dos dados (azimute do sol, ângulo de elevação solar no horário da aquisição da imagem e ângulo de visada do sensor) que pode estar interferindo nos valores de reflectância de superfície detectados pelo sensor WFI/CBERS 2.

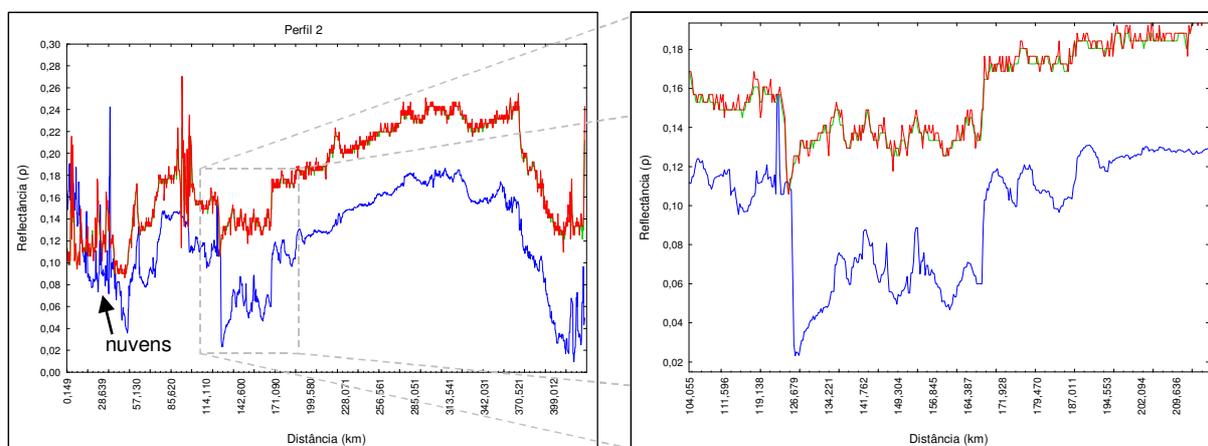


Figura 3 – Perfil 2: (—) MODIS/TERRA, (—)WFI/CBERS-2 e (—) WFI/ filtro mediana.

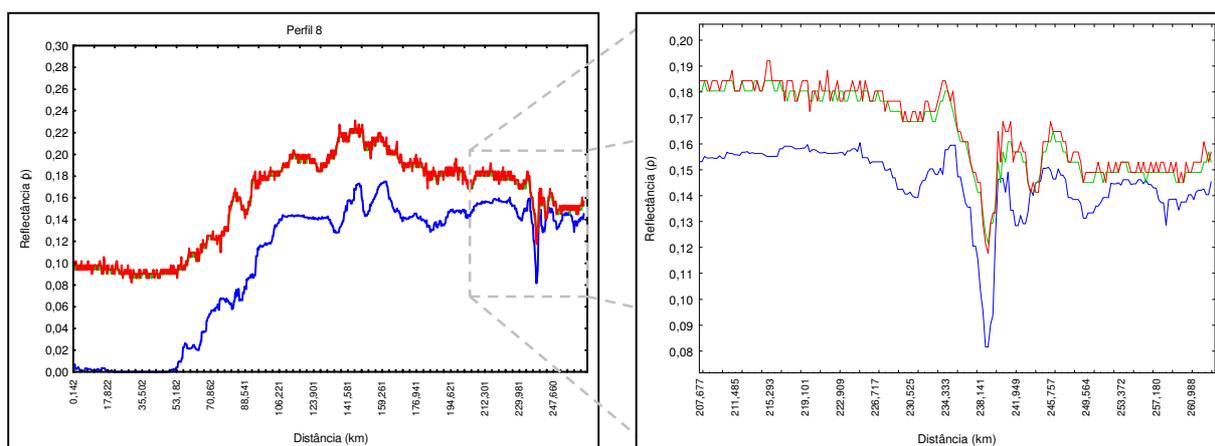


Figura 4 – Perfil 8: (—) MODIS/TERRA, (—) WFI/CBERS-2 e (—) WFI/ filtro mediana.

Quanto às correlações entre as imagens WFI/CBERS-2 com e sem a aplicação do filtro mediana com a imagem MODIS/TERRA (**Figura 5**), verificou-se que os perfis perpendiculares à costa apresentaram as maiores correlações entre os demais perfis, sendo que o perfil 7 apresentou a maior correlação ( $r = 0,91$ ) entre os sensores. Estes perfis passam por gradientes de concentrações de materiais em suspensão que podem variar, aproximadamente, de 0 a  $1,0 \text{ g.l}^{-1}$ , conforme citado anteriormente.

As menores correlações foram identificadas nos perfis que apresentaram menor variação nas concentrações de material em suspensão (perfis 3, 4 e 10) e nos perfis 1 e 2 devido às características de desenvolvimento da pluma.

As correlações realizadas entre as imagens WFI/CBERS-2 com e sem aplicação do filtro mediana e as imagens MODIS/TERRA mostram que a utilização do filtro não aumentou de forma significativa a correlação entre as imagens. As maiores diferenças entre as correlações para as imagens com a utilização do filtro foram identificadas nos perfis 3 e 4, mais próximos à desembocadura do Rio Amazonas (**Figura 5**).

A correlação entre todos os perfis juntos foi bastante significativa ( $r = 0,74$ ) (**Figura 5**) considerando as diferenças nos horários de passagem dos sensores e nas resoluções radiométricas.

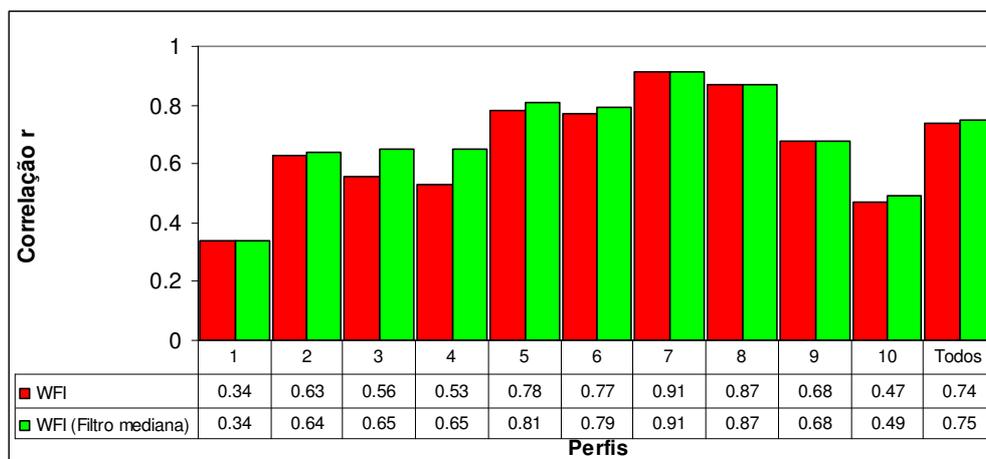


Figura 5 - Correlações entre o sensor WFI /CBERS 2 e WFI (Filtro mediana) com o sensor MODIS/TERRA.

## 5. Conclusões

Os perfis mostram que os sinais detectados por ambos os sensores referentes às variações nas concentrações de material em suspensão são semelhantes em forma, mas em regiões específicas, diferentes em amplitude. Esta característica está relacionada, provavelmente, às diferenças nas geometrias de aquisição das imagens de ambos os sensores e nos horários de aquisições das imagens.

O sensor MODIS/TERRA, devido a sua maior resolução radiométrica consegue resolver melhor as pequenas variações de reflectância presentes na pluma de materiais em suspensão. A imagem do sensor WFI/CBERS-2, por apresentar mais ruído e menor resolução radiométrica, não consegue resolver pequenas variações nas concentrações. Por este motivo os perfis que percorreram águas com pequenas variações nas concentrações de materiais em suspensão apresentaram correlações baixas. Desta forma, as maiores correlações encontradas estão nos perfis que apresentaram maior variabilidade na concentração de materiais em suspensão. Estes perfis estão, em sua maioria, orientados perpendicularmente à costa.

Considerando os diferentes horários de passagem dos satélites, as geometrias de aquisição de imagens e resoluções radiométricas dos sensores, as correlações encontradas foram significativamente altas.

Os resultados obtidos demonstram que o sensor WFI/CBERS-2 pode vir a ser utilizado em conjunto com o sensor MODIS/TERRA no monitoramento dos materiais em suspensão na foz do Rio Amazonas. Entretanto, as resoluções espaciais destes sensores impedem que estes sejam aplicados em estudos que necessitem de uma escala espacial maior, ou seja, restringe a utilização destes ao monitoramento de regiões costeiras relativamente extensas.

## 6. Referências Bibliográficas

Beardsley, R. C., J. Candela, et al. The M2 tide on the Amazon shelf. **Journal of Geophysical Research**. v. 100, n. C2, p 2283-2319, 1995.

Bentz, C. M., A. T. Politano, et al. Monitoramento ambiental de áreas costeiras e oceânicas com múltiplos sensores orbitais. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 57, n. 1, p. 43-47, 2005.

Chen, Z., P. J. Curran, et al. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing of Environment**. v. 40, p. 67-77, 1992.

Chen, Z., J. D. Hansom, et al. The form of the relationship between suspended sediment concentration and spectral reflectance: its implications for the use of Daedalus1268 data. **Remote Sensing Letters**. v. 12, p. 215-222, 1991.

Curran, P. J. and E. M. M. Novo. The Relationship Between Suspended Sediment Concentration and Remotely Sensed Spectral Radiance: a Review. **Journal of Coastal Research**. v. 4, n. 3, p. 351-368, 1988.

Esaias, W. E., M. R. Abbott, et al. An Overview of MODIS Capabilities for Ocean Science Observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 36, n. 4, p. 1250-1265, 1998.

Froidefond, J.-M., L. Gardel, et al. Spectral remote sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence. **Remote Sensing of Environment**. v. 80, p. 225–232, 2002.

- Gregg, W. W. and R. H. Woodward. Improvements in Coverage Frequency of Ocean Color: Combining Data from SeaWiFS and MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 36, n. 4, p. 1350-1353, 1998.
- Hu, C., Z. Chen, et al. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. **Remote Sensing of Environment**. v. 93, p. 423-441, 2004.
- Hu, C., E. Montgomery, et al. The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: Observation from space and S-PALACE floats. **Deep-Sea Research II**, v. 51, p. 1151-1171, 2004.
- Kinike, G. C., R. W. Sternberg, et al. Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf. **Continental Shelf Research**. v. 16, n. 5-6, p. 667-696, 1996.
- Mather, P. M. **Computer processing of remotely sensed images: an introduction**. West Sussex, England, John Wiley and Sons, 1999. 442 p.
- Meade, R. H., T. Dunne, et al. Storage remobilization of suspended sediment in lower Amazon River of Brazil. **Science**, v. 228, p. 488-490, 1985.
- Miller, R. L. and B. A. McKee. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. **Remote Sensing of Environment**. v. 93, p. 259-266, 2004.
- Morel, A. and L. Prieur. Analysis of the variation in the ocean color. **Limnology and Oceanography**. v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.
- Muller-Karger, F. E., C. R. McClain, et al.. The dispersal of the Amazon's water. **Nature**. v. 333, p. 56-58, 1988.
- Nittrouer, C. A. and D. J. DeMaster. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental Shelf Research**. v. 16, n. 5/6, p. 553-573, 1996.
- Novo, E. M. M., J. D. Hanson, et al. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**. v. 10, n. 7, p. 1283-1289, 1989.
- Tanré, D.; Deroo, C.; Duhaut, P.; Herman, M.; Morcrette, J.J. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. **International Journal of Remote Sensing**. v. 11, n. 4, p. 659-668, 1990.
- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Disponível em: < <http://modis.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 23 jun. 2006.
- Wide Field View Imager (WFI). Disponível em:< <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>>. Acesso em: 17 jun. 2006.