

Sobre as críticas feitas à modelagem empírica para estimativa da concentração de sedimentos suspensos via sensoriamento remoto

Otávio Cristiano Montanher ¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo ²
Lino Augusto Sander de Carvalho ²
Cláudio Clemente Faria Barbosa ²

¹ Universidade Estadual de Maringá – UEM
Av. Colombo, 5.790, Jardim Universitário, Maringá, PR, Brasil.
Programa de Pós-graduação em Geografia; GEMA – Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente -
otaviocmontanher@yahoo.com.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
evlyn@dsr.inpe.br; linoaugusto@yahoo.com.br; claudio@dpi.inpe.br

Abstract. The use of empirical models for water quality parameters retrieval based on orbital radiometric data has been criticized by the remote sensing scientific community. While earlier studies were widely based on empirical methods, currently, a great effort is focused in another direction: the development of analytical models. Controversially, in this paper we present a wide review of current studies (2009 – 2014), based on empirical models to evaluate spatial-temporal distribution of suspended sediment concentrations (SSC) in case 2 waters. As we have founded an inconsistency in the bibliography, this paper aims to discuss what are the reasons for that. In order to support our views, we carried out a residual analysis of empirical models for SSC retrieval to identify possible limiting factors. Five empirical models for Amazonian rivers, based on Landsat 5/TM data were used. The results do not demonstrate any relationship between model errors and: (i) time (1984-2011); (ii) period of the year; (iii) SWIR band 5 as a proxy of the Sun Glint effect; (iv) solar zenithal angle; (v) an index of atmospheric scattering. As the models estimates aren't related with those variables, they can be applied to any scene along time, allowing for SSC monitoring. The large sample number of scenes used in those models, acquired in a wide range of acquisition geometry, atmospheric conditions among other variables should explain the success for application.

Palavras-chave: Empirical models, suspended sediments, spatio-temporal constraints; modelos empíricos, sedimentos em suspensão, restrições espaciais e temporais.

1. Introdução

O desenvolvimento de técnicas que utilizam o sensoriamento remoto para o estudo de qualidade d'água começou na década de 1970 (Ritchie e Shiebe, 2000). Algumas das primeiras pesquisas tinham como objetivo estimar a concentração de sedimentos suspensos (CSS) e buscavam modelos que pudessem ser universalmente aplicáveis (Holyer, 1978). Embora posteriormente muitos estudos de caso tenham mostrado boas relações entre os dados orbitais e as medida *in situ* (Khorram, 1985; Ritchie et al. 1987; Aranuvachapun e Walling, 1988), duas limitações foram apontadas em desacordo com essa linha de pesquisa inicial: (i) esses modelos particulares não forneciam boas estimativas quando aplicados em outras imagens e em outros corpos hídricos; (ii) aproximadamente no mesmo contexto histórico, foram realizados muitos estudos detalhados em laboratório que mostraram que além da concentração de sedimentos, outras características desses materiais influenciam na intensidade e na forma do espectro de reflectância, como a composição e a textura (Novo et al. 1989; Novo et al. 1991; Han e Rundquist, 1996, Lodhi et al. 1997).

Com base nesses dois fatos, frequentemente encontram-se críticas ao uso de modelos empíricos para estimativa da CSS com o argumento de que não são aplicáveis para outras imagens além daquelas que foram utilizadas para sua geração dos modelos e para outros locais. Whitlock et al., (1982), já no começo da década de 80, afirmam que é impossível obter uma estimativa precisa dos coeficientes da equação de um determinado modelo empírico a partir da análise de regressão entre dados *in situ* e mais do que uma cena orbital. Esses autores

afirmam que modelos empíricos não deveriam ser utilizados para fins de monitoramento, sendo úteis apenas para validação de modelos matemáticos ou hidráulicos de difusão de sedimentos. Ritchie e Shiebe, (2000) afirmam que muitos estudos têm mostrado relações entre a CSS e os dados orbitais, mas não passam para a próxima etapa, que seria aplicar os modelos em outras cenas. Ainda segundo esses autores, um modelo desenvolvido especificamente para uma data e local não seria adequado caso as características dos sedimentos fossem alteradas posteriormente.

Dekker e Bukata (1999) afirmam que os métodos de inversão analítica produzem melhores resultados em relação aos modelos empíricos e semi-empíricos. Em consequência, atualmente um grande esforço tem sido feito a partir da abordagem analítica para estimativa de parâmetros de qualidade d'água. Entretanto, recentemente uma série de modelos empíricos também têm sido desenvolvidos e aplicados com sucesso, os quais têm conseguido demonstrar variações espaciais e temporais de corpos hídricos (Martinez et al., 2009; Wang et al., 2009; Kilham e Roberts, 2011; Espinoza Villar et al., 2012; Espinoza Villar et al., 2013; Long e Pavelsky, 2013; Mangiarotti et al., 2013; Feng et al., 2014; Kaba et al., 2014; Lobo et al., 2014; Park e Latrubesse, 2014; Zhang et al., 2014). Os resultados apresentados nos artigos dessa série de citações estão em desacordo com a afirmação de que modelos empíricos não são aplicáveis em outras cenas. Visto esse panorama, o intuito desse artigo é demonstrar por que alguns modelos empíricos são adequados para o objetivo de monitoramento.

2. Metodologia

Uma série de fatores pode fazer com que um modelo desenvolvido a partir de uma ou mais imagens não seja adequado para aplicação em outras cenas, esse conjunto será denominado como condições restritivas. Como condições restritivas, podem ser citadas: aspectos físico-químicos dos sedimentos; níveis de concentração; degradação do sensor; interferências do brilho solar (*Sun Glint*) e composição atmosférica. Assume-se que todas essas condições podem variar ao longo do tempo. Neste artigo serão apresentadas análises feitas em parte por Montanher (2013) sobre a relação entre algumas dessas condições restritivas e os resíduos das estimativas da CSS produzidas por modelos que estão apresentados de forma resumida em Montanher et al., (2014). São cinco modelos elaborados a partir de dados Landsat/TM, para rios da bacia amazônica caracterizados pelos altos níveis de CSS, os rios de águas brancas. Os resíduos de cada um desses modelos foram plotados contra cinco variáveis.

A seguir as condições restritivas estão descritas, bem como as hipóteses assumidas: (1) ângulo zenital solar; (2) B1 – B5: índice de espalhamento atmosférico, em que a banda do azul, a mais sensível ao espalhamento atmosférico e menos sensível às variações dos níveis de CSS, é subtraída em relação à banda 5, insignificamente afetada pelo espalhamento atmosférico, mas registra o sinal refletido pela interface d'água (*Sun glint*), o qual não é desejado para essa variável; (3) B5: banda 5: os componentes opticamente ativos presentes na água não são detectados na faixa espectral do SWIR, pois a água absorve quase toda REM incidente, mas há o registro do brilho solar. Assume-se que os erros de estimativa tendem a aumentar à medida que aumentam os valores das variáveis de i a iii. (4) Tempo: devido à degradação do sensor ao longo do tempo, pode haver uma relação linear (positiva ou negativa) entre os resíduos e o tempo; (5) Dia Juliano: pode haver, ao longo do ano, diferentes tipos de sedimentos sendo transportados pelos rios, de forma que os erros podem se concentrar em determinados períodos do ano.

Foram feitos testes de regressão entre os resíduos, transformados para valores absolutos, e as variáveis 1 a 4. Como as variáveis atuam de forma conjunta, também foi feito um teste multivariado com estas variáveis explanatórias. A variável 5 não foi incluída nas análises de regressão porque não deve haver alguma relação linear entre o dia juliano e os resíduos. Por

sua vez, será observado se os erros acumulam-se preferencialmente em alguns períodos do ano, isso também será notado para a variável 4.

3. Resultados e discussões

Os gráficos de dispersão entre os resíduos de cada modelo e o ângulo zenital solar não mostram tendência clara de aumento dos erros à medida que aumenta o ângulo solar (Figura 1). Da mesma forma, também não foi apresentado padrão entre os resíduos e o índice de espalhamento atmosférico (Figura 2) ou com a banda 5 (Figura 3). Com relação ao tempo, não foi notada tendência de variação linear dos erros, ou aumento evidente em determinado período (Figura 4). De forma semelhante, não foram encontrados padrões sazonais no comportamento dos resíduos (Figura 6), embora haja uma diminuição dos erros nos modelos do Arco de Fitzcarraldo (no período próximo ao dia 200) e do Rio Madeira (no período próximo ao dia 175). As regiões abrangidas por esses dois modelos são sujeitas a secas anuais nesses períodos, o que leva a baixos níveis de CSS devido à baixa taxa de precipitação. Realmente, no período entre julho e setembro dificilmente há concentrações acima de 50 mg/l nestas drenagens. Como o nível de CSS é mais bem distinguido em baixas concentrações, estes erros estão ligados aos níveis de concentração, e não à entrada de diferentes tipos de materiais nas drenagens. As análises de regressão (univariadas ou multivariadas) também não indicam a existência de variável, ou combinação de variáveis que estejam explicando os resíduos (Tabelas 1 e 2).

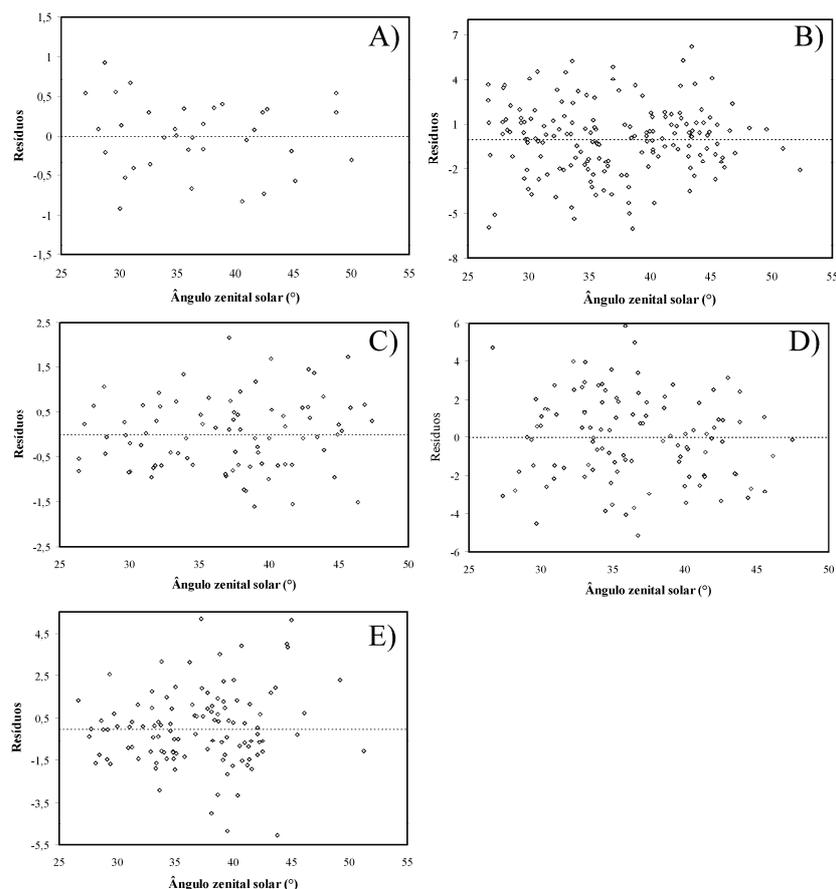


Figura 1. Relação entre os resíduos e o ângulo zenital solar no momento de aquisição das cenas, para cada modelo: Rio Beni (A); Rio Madeira (B); Rio Amazonas (C); Arco de Fitzcarraldo (D); Andes – baixa produção (E).

O caráter empírico dos modelos analisados faz com que haja realmente uma limitação espacial de aplicação, de forma que não se recomenda sua aplicação em outras regiões além

da bacia amazônica. No entanto, as análises de resíduos mostram que não há uma limitação temporal, ou seja, os modelos podem ser aplicados em quaisquer outras imagens nessa região. Esse resultado mostra que modelos empíricos podem ser utilizados para fins de monitoramento, ao contrário do recomendado na literatura. Esse caráter abrangente desses modelos foi atingido devido à grande quantidade de dados utilizados para calibração, os quais incluem todas as épocas do ano e diferentes ciclos hidrológicos (Figura 5), o que garante que muitas das possíveis condições de terreno estejam nele incluídas. Essa grande quantidade de dados para calibração dos modelos é possível apenas recentemente, com a disponibilidade gratuita de dados Landsat e MODIS. Além disso, cada dado *in situ* possui uma cena correspondente, e não há mais de uma coleta por data. Isto faz com que os dados em campo e radiométricos sejam independentes. Isto provavelmente foi um fator limitante aos modelos de Ritchie et al. (1987), pois os dados *in situ* consistem em cinco pontos de coleta. Portanto, para cada imagem há cinco coletas que são dependentes sob o ponto de vista das condições restritivas.

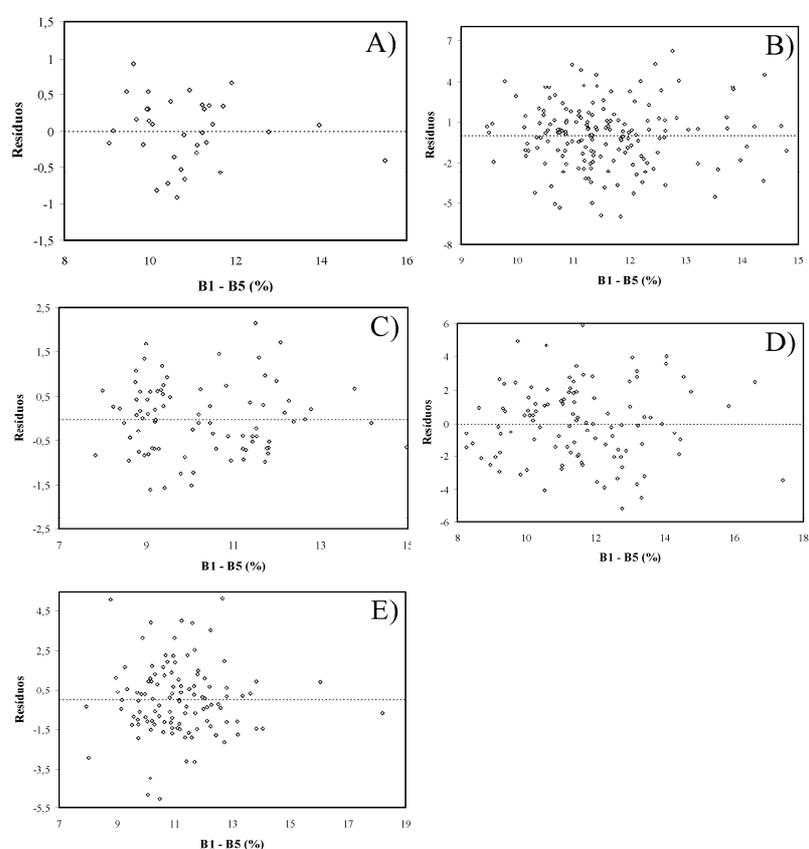


Figura 2. Relação entre os resíduos e o índice de espalhamento atmosférico, para cada modelo: Rio Beni (A); Rio Madeira (B); Rio Amazonas (C); Arco de Fitzcarraldo (D); Andes – baixa produção (E).

Tabela 1 – Resultados das análises de regressão simples entre os resíduos e cada uma das variáveis predictoras, para cada modelo.

Modelo	Beni		Madeira		Amazonas		Arco de Fitzcarraldo		Andes – baixa produção	
	R ²	p	R ²	p	R ²	p	R ²	p	R ²	p
$\theta_s \Theta$	0,009	0,5	0,02	0,06	0,01	0,2	0,01	0,19	0,07	0,003
B1 – B5	0,01	0,5	0,01	0,16	< 0,001	0,8	0,02	0,1	0,006	0,38
B5	0,02	0,4	0,01	0,11	0,01	0,3	0,002	0,64	0,05	0,01
Tempo	0,003	0,7	0,01	0,17	0,01	0,2	0,001	0,7	0,007	0,37

Tabela 2 – Resultados da análise de regressão múltipla entre os resíduos e as quatro variáveis preditoras apresentadas na Tabela 1, para cada modelo.

Modelo	Beni	Madeira	Amazonas	Arco de Fitzcarraldo	Andes – baixa produção
R ²	0,05	0,05	0,02	0,05	0,09
Valor-p	0,79	0,065	0,66	0,21	0,02

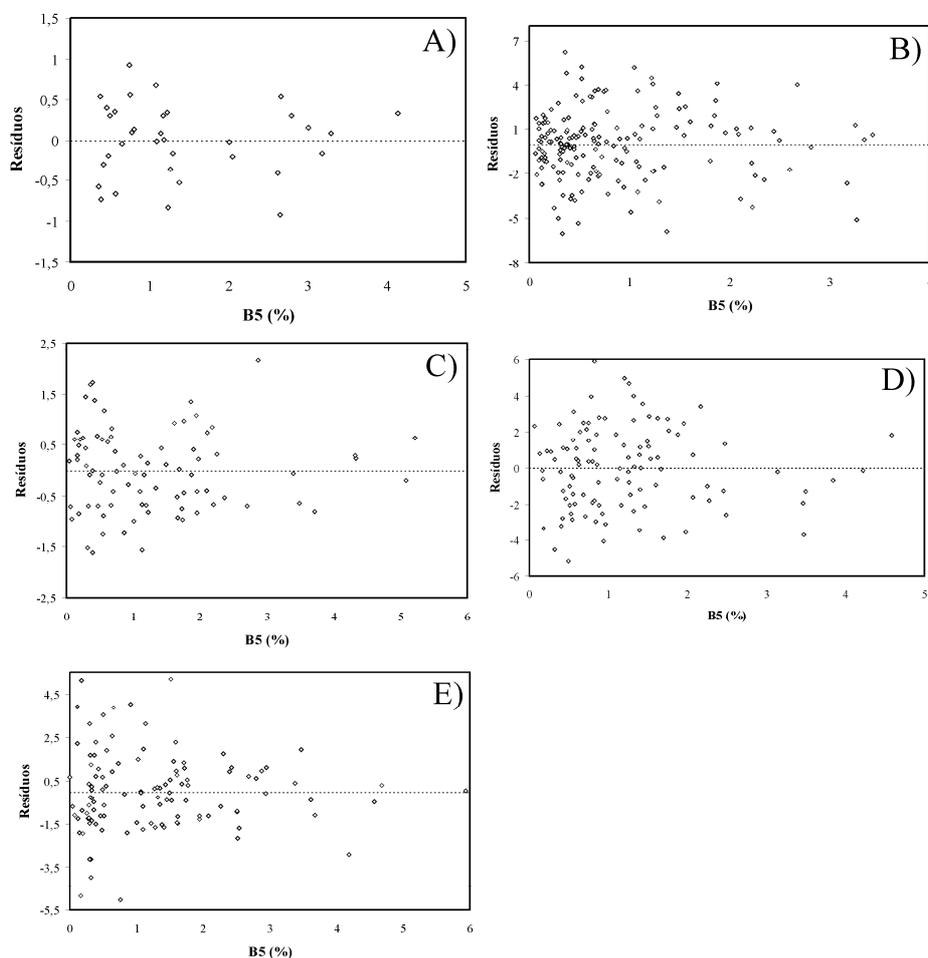


Figura 3. Relação entre os resíduos e a banda 5, para cada modelo: Rio Beni (A); Rio Madeira (B); Rio Amazonas (C); Arco de Fitzcarraldo (D); Andes – baixa produção (E).

DEKKER e BUKATA (1999) afirmam que modelos analíticos fornecem melhores resultados quando comparados aos modelos empíricos. Esses autores ainda afirmam que para modelagem do espectro de reflectância e seu posterior uso para estimativa da concentração dos constituintes, é necessário conhecer as relações entre as propriedades ópticas inerentes e aparentes dos materiais em estudo. No entanto, uma questão lógica surge: se, para uma correta modelagem analítica, é necessário conhecer *a priori* as propriedades físicas do material, o que exige a coleta *in situ*, e essas propriedades não podem alterar-se ao longo do tempo para que esses modelos possam ser utilizados para fins de monitoramento, os modelos analíticos não estariam sujeitos à mesma restrição imposta aos modelos empíricos? Realmente, se o processo de transferência radiativa, provocada pelos constituintes, é conhecido e modelado, isso garante uma alta robustez para sua aplicação, desde que os materiais não estejam variando ao longo do tempo. Essa condição temporal faz com que a modelagem analítica, por si apenas, não forneça, necessariamente, melhores resultados do que as outras abordagens. Mais importante do que a abordagem a ser utilizada, deve-se levar em conta se os modelos estão sendo gerados com a maior amplitude de condições possíveis que o ambiente pode apresentar, isso fará com que os modelos possam ser aplicados para fins de monitoramento. Além dessa questão, os modelos analíticos, na maior parte das vezes,

propõem soluções aproximadas das equações de transferência radiativa, o que aumenta as incertezas de modelagem, o que conseqüentemente leva ao aumento dos erros de estimativa.

5. Conclusões

Os resíduos das estimativas são independentes em relação: ao ângulo zenital solar, ao período do ano em que a coleta foi feita, ao tempo e a índices espectrais que estão relacionados com o espalhamento atmosférico (B1 – B5) e ao brilho solar (B5). A análise multivariada também mostra que não há interações maiores entre essas variáveis ao explicar os resíduos. A análise de resíduos mostrou que modelos empíricos, quando feitos a partir de uma grande amplitude de condições possíveis, podem ser adequados para aplicação em outras imagens, atingido o objetivo de monitoramento da qualidade d’água via dados orbitais. A disponibilidade de grande quantidade de dados gratuitos (Landsat, MODIS) atualmente permite a geração de modelos empíricos robustos, condição inexistente até meados dos anos 2000. Portanto, a bibliografia voltada ao uso de sensoriamento remoto para estimativa dos parâmetros de qualidade d’água deve atualizar-se em relação ao novo panorama apresentado.

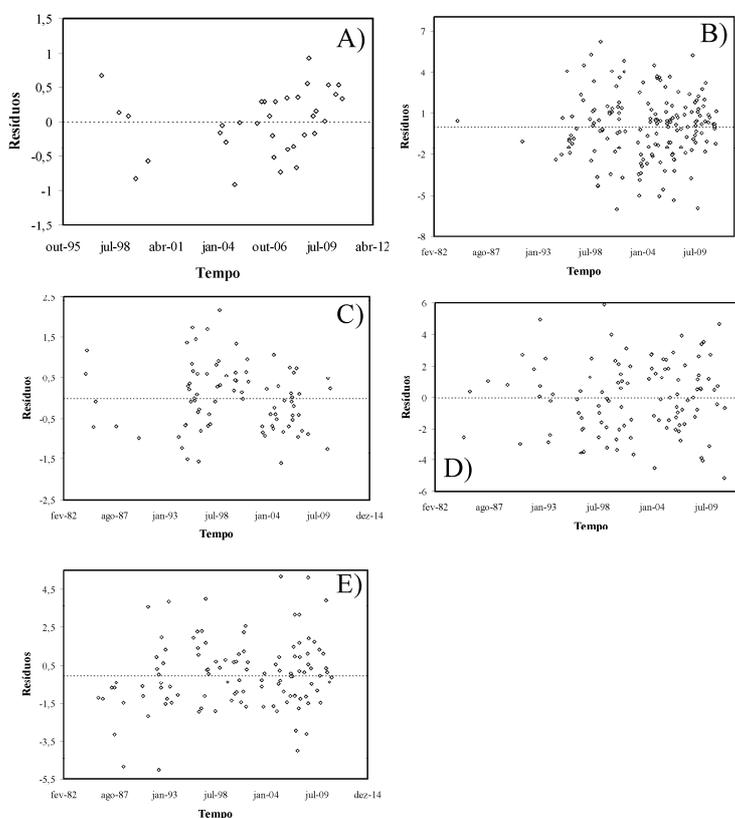


Figura 4. Relação entre os resíduos e o tempo, para cada modelo: Rio Beni (A); Rio Madeira (B); Rio Amazonas (C); Arco de Fitzcarraldo (D); Andes – baixa produção (E).

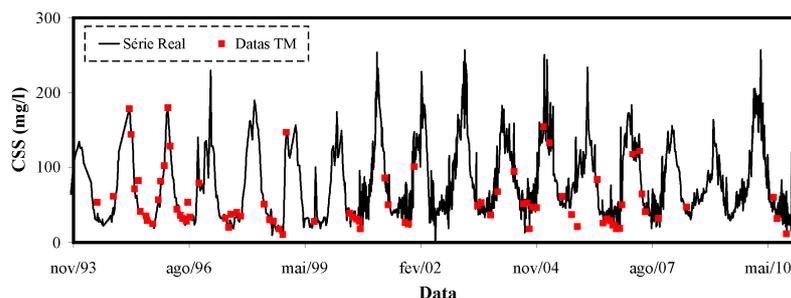


Figura 5. Série real de CSS do Rio Amazonas e dados usados no modelo (em vermelho). Note que foram utilizados vários ciclos hidrológicos, em vários anos.

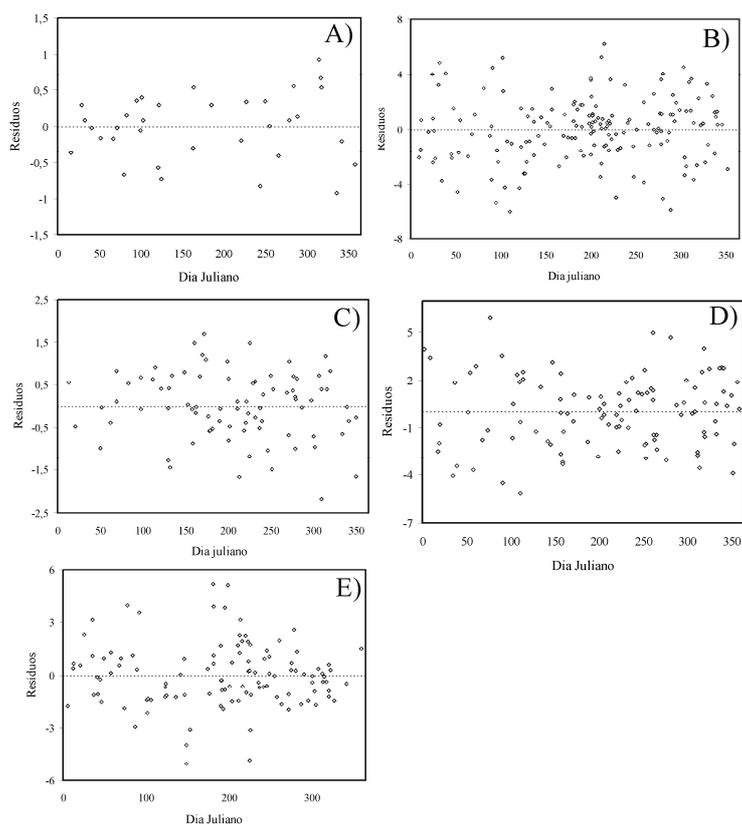


Figura 6. Relação entre os resíduos e o dia juliano, para cada modelo: Rio Beni (A); Rio Madeira (B); Rio Amazonas (C); Arco de Fitzcarraldo (D); Andes – baixa produção (E).

6. Referências

- Aranuvachapun, S.; Walling, D. E. Landsat-MSS Radiance as a Measure of Suspended Sediment in the Lower Yellow River (Hwang Ho). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 2, p. 145-165, 1988.
- Dekker, A.G.; Bukata, R.P. Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. In: Stone W.R. (Editor). **Review of Radio Science 1996 – 1999**. Wiley-IEEE, 1999, p. 519 – 534.
- Espinoza Villar, R.; Martinez, J.M.; Guyot, J.L.; Fraizy, P.; Armijos, E.; Crave, A.; Bazán, H.; Vauchel, P.; Lavado, W. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. **Journal of Hydrology**, v. 444, p. 221–228, 2012.
- Espinoza Villar, R.; Martinez, J.M.; Texier, M.L.; Guyot, J.L.; Fraizy, P.; Meneses, P.R.; Oliveira, E. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 45–54, 2013.
- Feng, L.; Hu, C.; Chen, X.; Song, Q. Influence of the Three Gorges Dam on total suspended matters in the Yangtze Estuary and its adjacent coastal waters: Observations from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 779 – 788. 2014.
- Han, L.; Rundquist, D.C. Spectra characterization of suspended sediments generated from two texture classes of clay soil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 3, p. 643 – 649, 1996.
- Holyer, R.J. Towards universal suspended sediment algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 7, p. 323 – 338, 1978.
- Kaba, E.; Philpot, W.; Steenhuis, T. Evaluating suitability of MODIS-Terra images for reproducing historic sediment concentrations in water bodies: Lake Tana, Ethiopia. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, p. 286-297, 2014.

Khorram, S. Development of water quality models applicable throughout the entire San Francisco Bay and Delta. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, v. 51, n.1 p. 53-62, 1985.

Kilham, N.E.; Roberts, D. Amazon river time series of surface sediment concentration from MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 10, p. 2659-2679, 2011.

Lobo, F.L.; Costa, M.P.F.; Novo, E.M.L.M. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian Waters impacted by gold mining activities. **Remote Sensing of Environment**, *In Press, Available online* 8 July, 2014.

Lodhi, M.A.; Rundquist, D.C.; Han, L.; Kuzila, M.S. The Potential for Remote Sensing of Loess Soils Suspended in Surface Waters. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n. 1, p. 111 – 117, 1997.

Long, C.M.; Pavelsky, T.M. Remote sensing of suspended sediment concentrations and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, p. 197-209, 2013.

Mangiarotti, S.; Martinez, J.M.; Bonnet, M.P.; Buarque, D.C.; Filizola, N.; Mazzega, P. Discharge and suspended sediment flux estimated along the mainstream of the Amazon and the Madeira Rivers (from in situ and MODIS Satellite Data). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 341-355, 2013.

Martinez, J.M.; Guyot, J.L.; Filizola, N.; Sondag, F. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. **Catena**, v. 79, n. 3, p. 257 - 264, 2009.

Montanher, O.C. **Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas a partir de imagens Landsat 5**. 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.

Montanher, O.C., Novo, E.M.L.M., Barbosa, C.C.F., Rennó, C.D., Silva, T.S.F. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat/TM. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 29, p. 67-77, 2014.

Novo, E.M.L.M.; Hanson, J.D.; Curran, P.J. 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.

Novo, E.M.L.M.; Steffen, C.A.; Braga, C.Z.F. Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance to total suspended solids. **Remote Sensing of Environment**, v. 36, n.1, p. 67-72, 1991.

Park, E.; Latrubesse, E.M. Modeling suspended sediment patterns of the Amazon River using MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 232-242, 2014.

Ritchie, J.C.; Cooper, C.M.; Yongqing, J. Using Landsat Multispectral Scanner Data to Estimate Suspended Sediments in Moon Lake, Mississippi. **Remote Sensing of Environment**, v. 23, p. 65–81, 1987.

Ritchie, J.C.; Shiebe, F.R. Water Quality. In: **Remote Sensing in Hydrology and Water Management**. Edited by Shultz, G.A.; Engman, E.T. Springer, 2000.

Wang, J.J.; Lu, X.X.; Liew, S.C.; Zhou, Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1082–1092, 2009.

Whitlock, C.H.; Kuo, C.Y.; Lecroy, S.R. Criteria for the Use of Regression Analysis for Remote Sensing of Sediment and Pollutants. **Remote Sensing of Environment**, v. 12, p. 151-168, 1982.

Zhang, M., Dong, Q., Cui, T., Xue, C., Zhang, S. Suspended sediment monitoring and assessment for Yellow River estuary from Landsat TM and ETM + imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 146, p. 136-147, 2014.