

Avaliação do impacto dos reservatórios em cascata sobre o fluxo de sedimentos no rio Paranapanema

Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya¹

Jean-Michel Martinez²

Marcos Gomes Nogueira³

Walszon Terllizzie Araújo Lopes¹

Gérard Cochonneau²

Dhalton Ventura¹

Maurrem Ramon Vieira¹

Eurides de Oliveira¹

Valdemar Santos Guimarães¹

¹ Agência Nacional de Águas – ANA

Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco L- 70610-200 - Brasília – DF, Brasil.
rita.piscoya, walszon, dhalton.ventura, maurrem, eurides, valdemar@ana.gov.br

² Institut de Recherche pour le Développement (IRD), GET

14, Avenue Edouard Belin - 31400 - Toulouse, França.

jean-michel.martinez@ird.fr, gerard.cochonneau@ird.fr

³ Universidade Estadual Paulista - UNESP, Instituto de Biociências, Depto. Zoologia

Distrito de Rubião Júnior s/n - 18618-970 - Botucatu - SP, Brasil

nogueira@ibb.unesp.br

Abstract. Automated monitoring of river sediments using images of the spatial sensor MODIS allows monitoring of large areas at low cost, enabling the national hydro-meteorological network expansion. The Brazilian National Water Agency – ANA and the Institut de Recherche pour Le Développement – IRD develop techniques for using of images sensors for the operationalization of the spatial data processing for automated monitoring of hydrological parameters such as suspended sediment concentration, chlorophyll-a and river levels. The aim of this study is to test the methodology developed within the framework of the project ANA/IRD, assessing the sediment flow into the Paranapanema River, using data from the MODIS sensor. Virtual stations were determined and the reflectance sensor MODIS data was analyzed from areas upstream and downstream of hydropower plants Jurumirim, Chavantes, Canoas II, Capivara, Taquaruçu and Rosana in the Paranapanema River; and in areas downstream and upstream from the mouth of the Paranapanema River in the Paraná River. Reflectance data of each area were compared with each other and with turbidity and total solids data from a in situ monitoring station 64214000 and with the useful volume data of some reservoirs. The results obtained in the Paranapanema River demonstrate the potential use of this technology for the determination of suspended sediment concentration and turbidity, allowing, after a fine calibration method with field data, the operation of the sediment monitoring of the Paranapanema river basin.

Palavras-chave: Spacial Hydrology, MODIS sensor, hidrologia espacial; sensor MODIS.

1. Introdução

A caracterização do comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para a adequada gestão e uso de recursos hídricos. Atualmente, a Agência Nacional de Águas – ANA é responsável por mais de 500 estações sedimentométricas no território brasileiro, conferindo uma densidade média de uma estação a cada 17 mil km². Por unidade fisiográfica, a densidade existente se aproxima dos valores recomendados pela Organização Meteorológica Mundial – OMM, entretanto, a periodicidade de amostragem é trimestral. Tendo em vista a abrangência do território brasileiro e o alto custo para realização de medições sedimentométricas, são necessários mais esforços para fornecer dados em quantidade e qualidade que possibilitem o conhecimento do comportamento

hidrossedimentológico das bacias hidrográficas e permitam a adequada gestão e uso dos recursos hídricos.

A Agência Nacional de Águas – ANA e o *Institut de Recherche pour Le Développement* – IRD desenvolveram um projeto intitulado “Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias (Quantidade e Qualidade) - Projeto “MEG-HIBAM”, que teve como objetivo a demonstração da possibilidade de monitorar parâmetros hidrológicos com o uso de sensores espaciais. No âmbito do projeto foram realizadas as seguintes atividades: a) avaliação da qualidade de água utilizando parâmetros de qualidade extraídos de sensores espaciais imageadores; b) desenvolvimento de ferramentas para processamento de dados em massa de sensores espaciais e c) produção de séries temporais de parâmetros hidrológicos nas bacias Amazônica e do Nordeste. A segunda etapa do projeto objetiva o desenvolvimento de técnicas de altimetria e uso de sensores imageadores, visando à operacionalização do processamento de dados espaciais para o monitoramento automatizado de parâmetros hidrológicos, tais como concentração de sedimentos em suspensão, classes de clorofila-a e níveis de rios.

A literatura apresenta muitos trabalhos que tratam da sensibilidade da reflectância dos sensores remotos às concentrações de sedimentos suspensos nos oceanos e em águas interiores (Martinez et al., 2009). Um significativo número de pesquisadores tem reportado uma forte correlação positiva entre concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) e a radiância espectral, destacando que a relação pode depender do intervalo de concentração, dos tipos de água e da origem da matéria suspensa. A maioria dos estudos aponta que a melhor correlação entre reflectância e a CSS está entre 700 e 800 nm em águas interiores turvas.

Martinez et al. (2009) quantificou o balanço de sedimentos no Rio Amazonas utilizando dados de reflectância derivados de 554 imagens do sensor espacial MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) do período de 2000 a 2009, e dados mensais da carga de sedimentos suspensos da rede de monitoramento do projeto HYBAM, do período de 1995 e 2007. Os resultados mostram um aumento da reflectância da água na banda infravermelha do MODIS em função de medidas da concentração de sedimentos suspensos na superfície. O estudo apresentou equação relacionando sedimentos suspensos na superfície e a média de sedimentos suspensos e determinou a descarga sólida média do Rio Amazonas em Óbidos no período de 1996 e 2007, contribuindo para a quantificação dos processos de erosão em um dos principais ecossistemas naturais remanescentes. Os dados de reflectância da superfície das águas do Rio Amazonas revelaram uma relação robusta com a concentração de sedimentos suspensos para a superfície do rio sobre um intervalo grande de concentração e para vários anos hidrológicos consecutivos. O estudo mostrou que, com a combinação da excelente resolução temporal e uma fina calibração, os dados do MODIS podem ser usados operacionalmente com observações de campo para prover mais informações sobre bacias sem monitoramento ou com monitoramento insuficiente.

O monitoramento automatizado de sedimentos utilizando imagens do sensor espacial permitirá o monitoramento de grandes áreas a baixo custo, ampliando a rede hidrometeorológica nacional. Para operacionalização deste monitoramento, faz-se necessário testar as metodologias desenvolvidas no projeto ANA/IRD, criando estações virtuais, processando imagens MODIS e comparando os dados espaciais obtidos com dados de campo confiáveis existentes na rede de monitoramento nacional e/ou em outros projetos científicos.

O objetivo deste trabalho é testar a metodologia desenvolvida no âmbito do projeto ANA/IRD, avaliando o fluxo de sedimentos no rio Paranapanema, utilizando dados do sensor MODIS. Neste trabalho, serão analisadas áreas a montante e a jusante das UHEs Jurumirim, Chavantes, Canoas II, Capivara, Taquaruçu e Rosana; e áreas a jusante e a montante da desembocadura do rio Paranapanema no rio Paraná.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

Para realização deste estudo, foram definidas seis estações virtuais de qualidade de água abrangendo áreas a montante e a jusante das Usinas Hidroelétricas (UHEs) Jurumirim, Chavantes, Canoas II, Capivara, Taquaruçu e Rosana, no rio Paranapanema; e UHE Porto Primavera, no rio Paraná. A área de cada estação foi definida por um quadrante (Figura 1) e dentro de cada estação foram criadas máscaras para processamento de áreas menores (numeradas de 1 a 22). Estas áreas foram localizadas no reservatório (nas proximidades da UHE), e a jusante e a montante da UHE.

Para diferenciar a localização das áreas foi definido um código formado por letra e número; e o ponto central para definição da codificação em todas as estações foi uma UHE. Para as áreas a montante e a jusante de uma UHE foram estabelecidas, respectivamente, as letras M e J. A numeração acompanha o percurso do rio; quanto maior o número, mais a jusante está localizada a área. A área denominada Jusante da UHE (código J1) refere-se à área que se localiza a jusante da barragem, logo após a usina e a saída dos vertedouros.

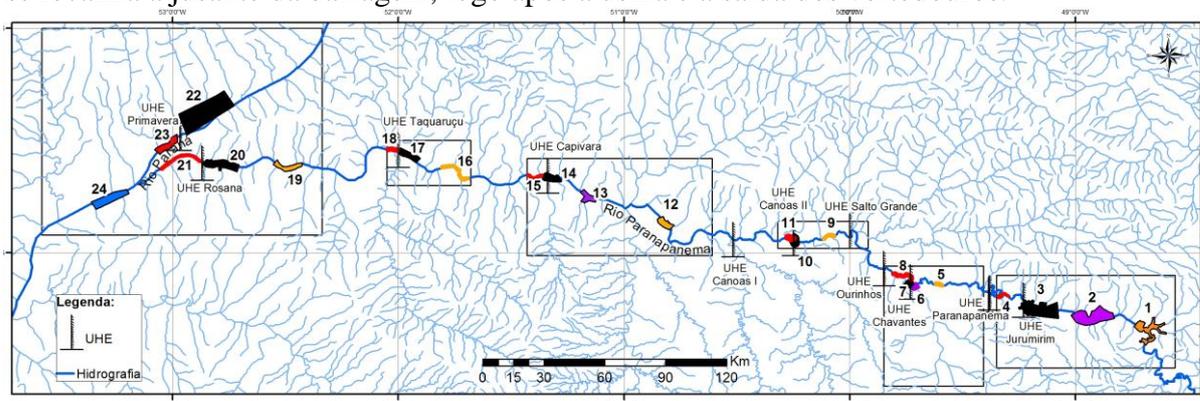


Figura 1. Estações virtuais. 1 a 4. Jurumirim M1, M3, M5 e J1; 5 a 8 – Chavantes M1, M5 e J1; 9 a 11 – Canoas II M1, M3 e J1; 12 a 15 – Capivara M1, M3, M5 e J1; 16 a 18 – Taquaruçu M1, M5 e J1; 19 a 21 – Rosana M1, M5 e J1; 22 e 23 – Primavera M5 e J1; 24 – Rio Paraná a jusante da foz do rio Paranapanema.

O Rio Paranapanema nasce na Serra de Agudos Grandes a uma altitude aproximada de 900 m. Tem extensão aproximada de 930 km em um desnível de 660 m, e seu curso desenvolve-se no sentido geral leste-oeste até desaguar no Rio Paraná, em altitude de 240 m. A Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema está localizada na Região Hidrográfica do Paraná, e abrange um total de 106.000 km², dos quais 51% encontram-se no Estado do Paraná e 49% no Estado de São Paulo (UGRH Paranapanema, 2010).

Lima et. al. (2005) estudaram o comportamento do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio Paranapanema e verificaram que a estação mais a jusante da bacia apresentou um fluxo médio de sedimentos em suspensão de cerca de 3.000 t/dia, a partir de uma área de drenagem que representa 85% da área estudada. O estudo destacou que a pequena quantidade de medições nos períodos de cheia nas estações analisadas constituiu fator limitante da qualidade dos resultados absolutos obtidos.

2.2 Imagens de Satélite

Foram utilizados os produtos compostos MOD09Q1 e MYD09Q1 dos sensores MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA, respectivamente. Estes produtos oferecem estimativas da reflectância de superfície, são corrigidos dos efeitos atmosféricos e georreferenciados, e suas imagens possuem resolução de 250 m e duas bandas radiométricas (1-vermelho e 2-

infravermelho). O produto composto a oito dias utilizado consiste da análise pixel por pixel de imagens diárias adquiridas durante oito dias e da seleção dos pixels de melhor qualidade, ou seja, com menor cobertura de nuvens e a melhor geometria. Foram utilizadas 534 imagens do sensor espacial TERRA, para o período de junho de 2000 a janeiro de 2012, e 435 imagens do sensor espacial AQUA, para o período de julho de 2002 a janeiro de 2012.

2.3 Tratamento das imagens de satélite

O programa MOD3R (MODIS Reflectance Retrieval over Rivers) foi utilizado para processamento automático das imagens MODIS. O MOD3R foi desenvolvido pelo IRD em linguagem JAVA para a extração automática de séries temporais de reflectância das imagens MODIS dos corpos hídricos. O algoritmo desenvolvido para o programa determina com precisão e com consistência ao longo do tempo os pixels de água pura em uma imagem, ou seus melhores candidatos, independentemente dos tipos de morfologia dos rios. Com a extração dos valores de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho das imagens MODIS, é possível determinar as concentrações de superfície de sedimentos e fitoplâncton da água. O programa gera arquivos de saída com resumos das imagens processadas e o resultado para cada imagem é acompanhado por um indicador de qualidade.

2.3 Séries temporais de reflectância

Sedimentos suspensos presentes na superfície dos corpos hídricos apresentam características típicas na parte visível e do infravermelho do espectro que podem ser determinadas utilizando imagens de satélite. A quantidade de sedimentos modifica as propriedades ópticas das águas com um aumento das propriedades de absorção e espalhamento da luz e com um padrão espectral característico: a absorção da luz pelo material particulado é mais forte no azul e decresce de maneira exponencial até o vermelho / infravermelho, enquanto que as propriedades de espalhamento da luz não variam significativamente em função do comprimento de onda. Este conjunto de propriedades espectrais faz com que a reflectância das águas turvas fique menor no azul e aumente no verde e vermelho, dando o aspecto “marrom” característico dessas águas. No infravermelho, a forte absorção da luz pela água pura reduz a sensibilidade da reflectância ao aumento do espalhamento pelo material particulado. Por essa razão, neste trabalho priorizou-se a análise da banda 1 vermelha do produto MODIS com 250 m de resolução.

2.4 Comparação com dados de campo

Os dados de reflectância da banda do vermelho foram comparados com dados de turbidez e sólidos totais da estação 64214000 - Res. Jurumirim (SP-255 Avaré / Itaí), disponíveis no banco institucional da ANA; e com o volume útil dos reservatórios Jurumirim, Chavantes e Capivara, disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, em sua página eletrônica.

3. Resultados e discussão

Foram extraídas séries temporais dos valores de reflectância na banda do vermelho de áreas dentro de cada estação virtual de qualidade no rio Paranapanema, avaliando áreas próximas às barragens (a montante e a jusante) e áreas mais a montante dos reservatórios.

A Figura 2 apresenta as séries temporais de reflectância na banda do vermelho de áreas de seis UHEs no rio Paranapanema. As áreas a montante mais próximas das UHEs (código M5) foram representadas no gráfico pela cor preta; as áreas que se iniciam após a saída da usina e dos vertedouros (J1), de cor vermelha. Tendo em vista a grande quantidade e variação dos dados, foi extraída a média mensal da reflectância para melhor visualização.

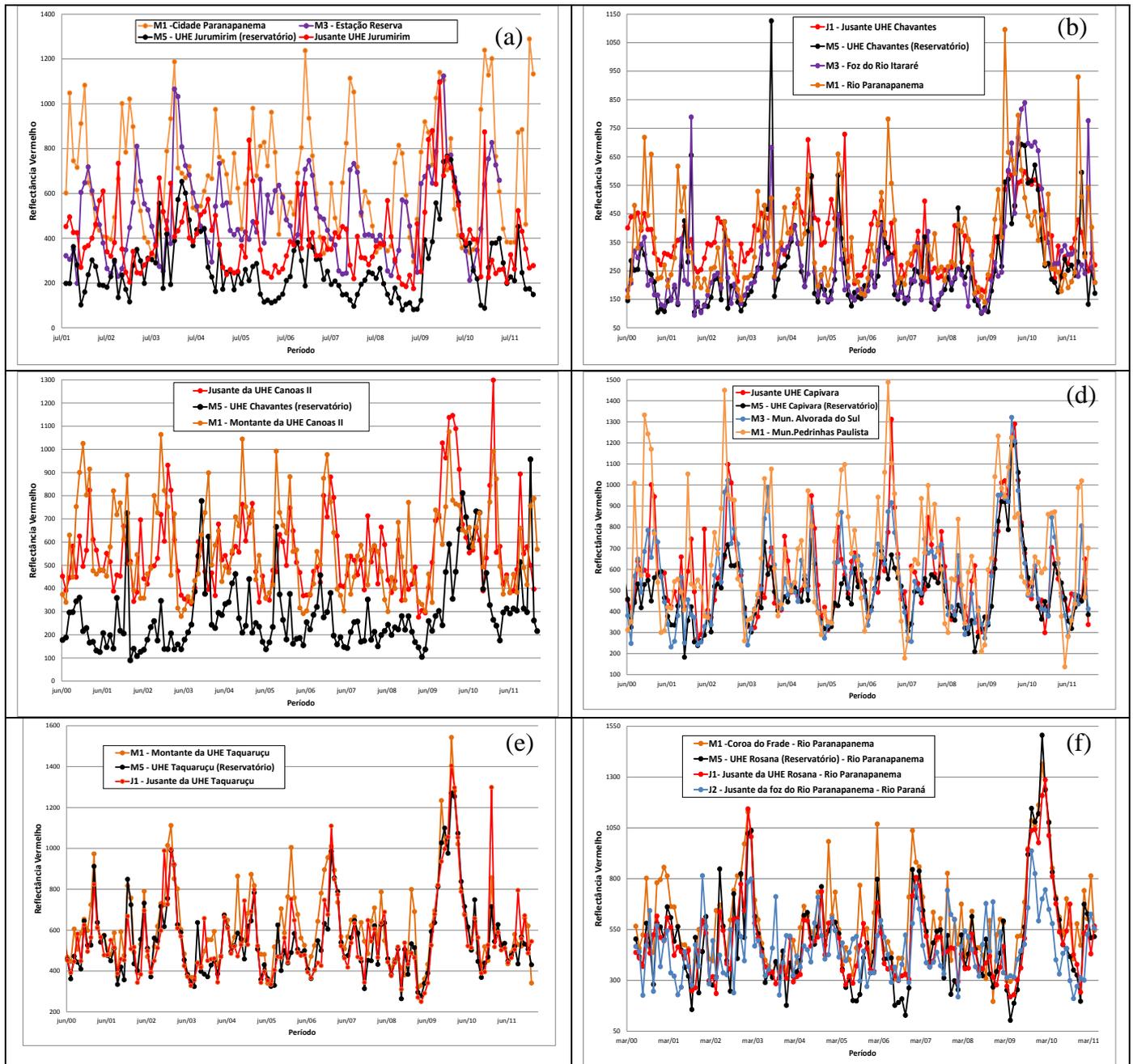


Figura 2. Série temporal da reflectância na banda do vermelho das estações virtuais de qualidade no rio Paranapanema. a) Jurumirim; b) Chavantes; c) Canoas II; d) Capivara; e) Taquaruçu; f) Rosana.

Os maiores valores de reflectância foram encontrados nas áreas mais a montante das UHEs. À medida que se desloca para jusante, os valores de reflectância diminuem, sendo observados os menores valores de reflectância nas proximidades das barragens. Após o reservatório, nos canais a jusante da barragem, os valores de reflectância aumentam novamente, presumivelmente porque a energia da água que passa pelas turbinas e vertedouros causa a ressuspensão de sedimentos.

Os mais baixos valores de reflectância na banda do vermelho encontrados nas áreas dos reservatórios nas proximidades das barragens indicam a baixa concentração de sedimentos suspensos e de turbidez na superfície do corpo hídrico. Esta característica corrobora as modificações previstas na zona do reservatório por diversos autores, ocasionadas pela redução

da velocidade da água e aumento na profundidade. Especificamente no rio Paranapanema, em um dos pontos de amostragem de maior profundidade no reservatório Chavantes, Nogueira et. al. (2012) encontraram alta transparência e baixos valores de turbidez e sólidos suspensos. O reservatório de Chavantes libera águas transparentes com baixas concentrações de sólidos suspensos tendo em vista a quantidade de sedimentos que são retidos nos compartimentos a montante do reservatório; esta retenção está relacionada com o grande tamanho e morfometria complexa do reservatório e o alto tempo de retenção da água. Similar estrutura foi descrita para o reservatório Jurumirim (Nogueira et al., 1999). Comparando os valores de reflectância das UHEs do rio Paranapanema, a UHE Chavantes possui os menores valores de reflectância, indicando as menores concentrações de sedimentos suspensos.

Foi encontrado o mesmo padrão de reflectância nas áreas estudadas das UHEs do rio Paranapanema e do rio Paraná. Os picos de reflectância existentes tendem a se repetir em todas as áreas analisadas, o que coincide com a época chuvosa.

A Figura 3 mostra a influência do regime de chuvas na concentração dos sedimentos no reservatório da UHE Jurumirim e da UHE Capivara. Com a chegada da estação chuvosa, há um acréscimo do volume útil do reservatório que é acompanhado, logo no início das chuvas, por um grande aumento da concentração de sedimentos nas águas do reservatório e na turbidez. Após este pico, as concentrações de sedimentos e a turbidez caem. Os menores valores de reflectância encontrados, que refletem as menores concentrações de sólidos em suspensão, estão associados aos menores volumes de água no reservatório. O mesmo comportamento foi encontrado no reservatório da UHE Chavantes.

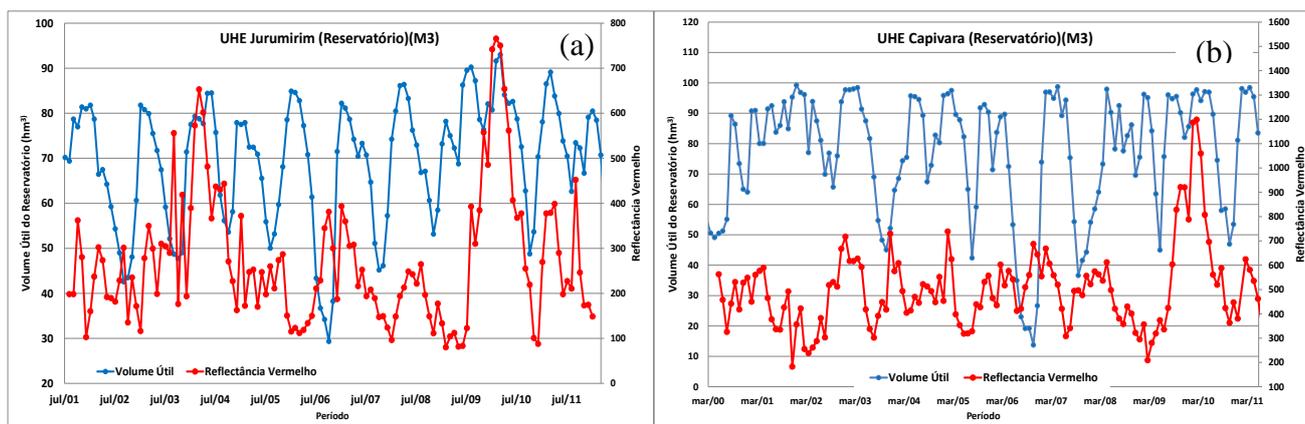


Figura 3. Série temporal de reflectância na banda do vermelho (média mensal) e volume útil mensal dos reservatórios da UHE Jurumirim e UHE Capivara.

A Figura 4 apresenta relação entre os valores das médias mensais de reflectância da banda do vermelho da estação virtual de qualidade e os valores de turbidez e de sólidos totais da estação convencional da CETESB (estação 6421.4000 - Reserva Jurumirim), localizada na área 2 (M3 – UHE Jurumirim). Os dados de turbidez e de sólidos totais são pontuais, referentes aos dias de amostragem, já os dados de reflectância representam a média mensal da resposta espectral da área do reservatório da UHE Jurumirim (M3). A semelhança de comportamento das curvas mostra o potencial do uso desta tecnologia para determinação da concentração de sedimentos e turbidez. Os melhores resultados foram obtidos com a turbidez, o que pode ser explicado pela forma de amostragem: a determinação de turbidez é feita retirando-se uma amostra de água superficial na seção média do rio; já a análise de sólidos é realizada em amostra homogeneizada, que representa toda a seção e toda a coluna d'água. Uma calibração fina do método - com medições *in situ* da reflectância e da concentração de sedimento e turbidez em um mesmo dia - permitirá a obtenção de equações de melhor ajuste e possibilitará a operacionalização do monitoramento na Bacia do Rio Paranapanema, nos

mesmos moldes do que já foi realizado no âmbito do Projeto Hidrologia Espacial (IRD/ANA) para quantificação de sedimentos na Bacia Amazônica (Martinez et al.,2009) e para a quantificação do grau de trofismo de reservatórios do Nordeste (Martinez et al.,2012).

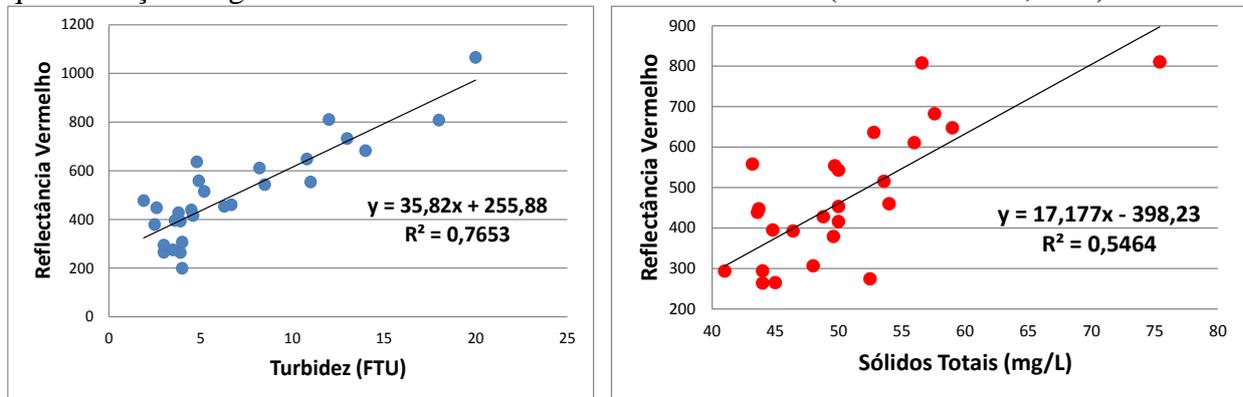


Figura 4. Relação entre médias mensais de reflectância da banda do vermelho da estação virtual de qualidade e os valores de turbidez e de sólidos totais da estação da CETESB (estação 6421.4000 - Reserva Jurumirim).

Para avaliar a contribuição de sedimentos do rio Paranapanema no rio Paraná, foram selecionadas áreas no rio Paraná e no rio Paranapanema, a montante e a jusante da última UHE do rio Paranapanema (UHE Rosana). Das três áreas selecionadas no rio Paraná, duas se encontram a montante da foz do rio Paranapanema e uma a jusante. No rio Paraná, as áreas a montante localizam-se no reservatório da UHE Primavera e após a saída do vertedouro da UHE Primavera; a área a jusante fica a cerca de 13 km a jusante da foz do rio Paranapanema.

Analisando os valores de reflectância encontrados nas áreas a jusante de todas as UHEs do rio Paranapanema (código J1), a área a jusante da UHE Rosana tem um dos mais baixos valores (Figura 5a), só não superando os encontrados nas áreas a jusante das UHEs Chavantes e Jurumirim, terceiro e primeiro reservatório do rio Paranapanema, respectivamente. Estes valores baixos de reflectância demonstram a retenção de sedimentos que ocorre nos compartimentos dos reservatórios das diversas UHEs em cascata do rio Paranapanema.

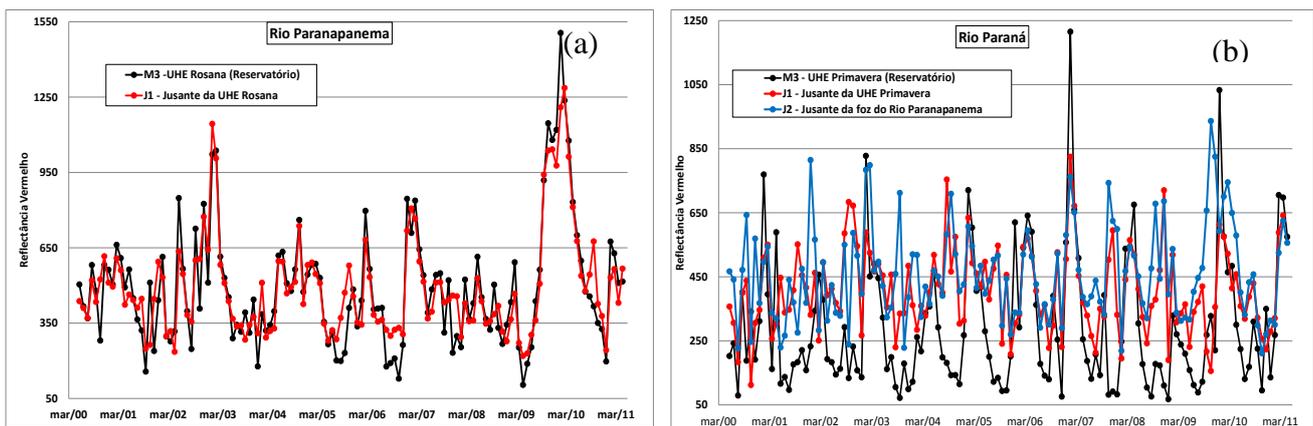


Figura 5. Série temporal de reflectância na banda do vermelho na última UHE do rio Paranapanema (UHE Rosana) e em três áreas no rio Paraná, a montante e a jusante da foz do rio Paranapanema.

Nas três áreas estudadas no rio Paraná (Figura 5b), embora sejam encontrados no reservatório da UHE Primavera os maiores picos de reflectância em fevereiro de 2007 e janeiro de 2010, os valores de reflectância encontrados nesta área são, em geral, os menores. O comportamento da reflectância nas áreas a montante e a jusante da foz do rio Paranapanema

são muito próximos. A diferença da média da reflectância da área Jusante da UHE Primavera (J1)(408) e da área Jusante da foz do rio Paranapanema (J2)(460) é de cerca de 52, o que representa uma variação de apenas 11% do valor médio da reflectância encontrada na Jusante da UHE Primavera. Se for aplicada a equação obtida para a UHE Jurumirim, que relaciona sólidos totais à reflectância na banda do vermelho, obter-se-ão no rio Paraná, nas áreas a montante e a jusante da foz rio Paranapanema, concentrações de sólidos totais da ordem de 52 mg/L e 54 mg/L. Na última área analisada no rio Paranapanema, situada a jusante da UHE Rosana e antes da desembocadura do rio Paranapanema no rio Paraná, foi encontrada uma concentração de sólidos totais de 55 mg/L. Verifica-se, portanto, que as águas do rio Paranapanema pouco influenciaram na concentração de sedimentos do rio Paraná. Este resultado corrobora o trabalho de Lopes et al. (2007), que, com dados de estações sedimentométricas, analisou o fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio Paraná no período de 1981 a 2002 e demonstrou que, na Bacia do Rio Paraná, o rio Paranapanema apresenta um dos menores valores de concentração média de sedimentos em suspensão.

4. Conclusões

Os maiores valores de reflectância foram encontrados nas áreas mais a montante das UHEs. À medida que se desloca para a jusante, os valores de reflectância diminuem, sendo observados os menores valores de reflectância nas proximidades das barragens.

As áreas estudadas das UHEs do rio Paranapanema e do rio Paraná possuem o mesmo padrão de reflectância. Os picos de reflectância existentes tendem a se repetir em todas as áreas analisadas, o que coincide com a época chuvosa.

Com a chegada da estação chuvosa, há um acréscimo do volume útil do reservatório que é acompanhado, logo no início das chuvas, por um grande aumento da turbidez e da concentração de sedimentos nas águas do reservatório. Os menores valores de reflectância encontrados estão associados aos menores volumes de água no reservatório.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram o potencial do uso desta tecnologia para determinação da concentração de sedimentos e turbidez, possibilitando, após uma calibração fina do método com dados de campo, a operacionalização do monitoramento sedimentométrico na Bacia do Rio Paranapanema.

Referências Bibliográficas

Lima, J.E.F.W.; Lopes, W.T.A.; Silva, E.M.; Vieira, M.R. Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio Paranapanema. In: Simpósio brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), XVI, 2005, João Pessoa. **Anais...** 2005.

Lopes, W.T.A.; Lima, J.E.F.W.; Vieira, M.R.; Dias, S.F. Análise do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Hidrográfica do rio Paraná. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (ENES), 7., 2007, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2007. Artigos, p. 95-109. 2007.

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

Martinez, J.M.; Ventura, D.; Vieira, M.R.; Attayde, J.L.; Bubel, A.P.; Coimbra, M.R.; Oliveira, E. Satellite-based monitoring of reservoir eutrophication in the Brazil Semi-arid region. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 5247-5254.

Nogueira, M.G.; Henry, R.; Maricatto, F.E. Spatial and temporal heterogeneity in the Jurumirim Reservoir, São Paulo, Brazil. *Lakes & Reser.: Res. And Manag.*, v.4, p.107-120, 1999.

Nogueira, M.; Perbiche-Neves, G.; Naliato, A. Limnology of two contrasting hydroelectric reservoirs (storage and run-of-river) in southeast Brazil. In: Samadi-Boroujeni, H. **Hydropower – Practice and Application**. Croatia: Editora Ivana Zec, 2012. cap. 8, p.167-184.