

UTILIZAÇÃO DE DADOS DO SENSOR ESPACIAL MODIS PARA CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO DE SEDIMENTOS NO RIO TOCANTINS

Rafael Bandeira Chaves Barcelos¹; Rita de Cássia Cerqueira Condé de Piscoya^{2}; Jean-Michel Martinez³; Rafael de Araújo Mendes¹; Camilla Turon Baran¹; Juliana Farias de Lima Oliviera¹; Tayline Alencar Marques Serafim¹; Pâmela Brenda Carvalho Gonçalves¹; Cecília Moreira Lima de Lemos¹; Gérard Cochonneau; Eurides de Oliveira²; Walszon Terllizzie Araújo Lopes².*

Resumo – A Agência Nacional de Águas – ANA e o *Institut de Recherche pour Le Développement* – IRD desenvolvem projeto para monitoramento hidrológico a partir do uso de sensores espaciais embarcados em satélites. O presente trabalho teve como objetivo a caracterização do fluxo de sedimentos do rio Tocantins utilizando dados do sensor MODIS, tripulados nos satélites Terra e Aqua. Foram selecionadas 22 áreas no rio Tocantins. As imagens de satélite foram processadas para extração dos valores de reflectância na banda do vermelho que responde à presença de sedimentos. Para processamento das imagens foi utilizado o programa MOD3R desenvolvido pelo IRD. Foram obtidos os valores de reflectância e qualificada a carga de sedimentos de cada trecho do rio Tocantins. O estudo evidenciou a interferência dos barramentos no fluxo de sedimentos, tanto a montante quanto a jusante de cada barramento. Observou-se, também, a influência da construção da UHE Peixe Angical que alterou o comportamento do fluxo de sedimento diminuindo a concentração de sedimentos por 100 km a montante e por 100 km a jusante.

Palavras-Chave – Rio Tocantins, sensor MODIS, fluxo de sedimentos.

USE OF SPACE SENSOR MODIS DATA TO CHARACTERIZE THE SEDIMENT FLOW IN THE TOCANTINS RIVER

Abstract – The Brazilian National Water Agency – ANA and the *Institut de Recherche pour Le Développement* – IRD develop a project related to hydrological monitoring using remote sensing. The main goal of this present work is the characterization of sediment flux of the Tocantins River using MODIS sensor data, Terra and Aqua satellites. Were selected 22 areas along the Tocantins River. The satellite images were processed to extract the values of reflectance in the red, which responds to the presence of suspended sediments. For image processing we used the MOD3R program, developed by the IRD. Reflectance values and sediment load were obtained for each stretch of the Tocantins River. The study showed the interference of reservoirs in the sediment fluxes, both upstream and downstream of each dam. The influence of the Peixe Angical dam was specifically studied showing the behavior of the sediment flow, decreasing the concentration of sediments in the upstream (100 km) and downstream (1000 km).

Keywords – Tocantins River, Sensor MODIS, Sediment flux.

¹ Estagiário da Agência Nacional de Águas, Setor Policial, área 5, Quadra 3, Bloco L, Brasília-DF. rafael.bcarcelos@gmail.com; rafael.araujo@ana.gov.br; tayline.serafim@ana.gov.br; camilla.baran@ana.gov.br; pamella.goncalves@ana.gov.br; ceciliamoreiralima1@gmail.com.

² Agência Nacional de Águas, Setor Policial, área 5, Quadra 3, Bloco L, Brasília-DF; rita.piscoya@ana.gov.br; walszon@ana.gov.br; eurides@ana.gov.br.

³ Institut de Recherche pour Le Développement; martinez@ird.fr; gerard.cochonneau@ird.fr.

* Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya

1. INTRODUÇÃO

Técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento estão sendo cada vez mais utilizadas em estudos hidrológicos. As imagens de sensores remotos embarcados em satélites ou aeronaves

permitem, após uma calibração com dados de campo, a estimativa de parâmetros hidrológicos a baixo custo financeiro sem a necessidade de instalação de estações no campo.

A Agência Nacional de Águas – ANA e o *Institut de Recherche pour Le Développement* – IRD desenvolvem projeto para monitoramento hidrológico a partir do uso de sensores espaciais embarcados em satélites, projeto HidroSat. Neste projeto é realizado o monitoramento automatizado de parâmetros hidrológicos tais como cota (nível de rio), turbidez, concentração de sedimentos e de clorofila, cujos dados são disponibilizados na internet por meio sistema HidroSat (Carvalho, 2015), disponível no endereço www.ana.gov.br/hidrosat.

O objetivo deste trabalho é avaliar o fluxo de sedimentos no rio Tocantins utilizando dados do sensor MODIS e aplicando a metodologia desenvolvida no âmbito do projeto ANA/IRD. Este trabalho faz parte dos estudos realizados pela ANA para ampliação do monitoramento automatizado por satélite realizado no projeto HidroSat.

2. METODOLOGIA DO TRABALHO

2.1 Área de estudo

Para realização deste estudo, foram definidas 22 estações virtuais no curso do rio Tocantins e de seus principais afluentes. A área de cada estação virtual foi definida por um quadrante (Figura 1) e dentro de cada estação foram definidas máscaras para processamento de áreas menores (numeradas de 1 a 22). Nos reservatórios das UHE Luiz Eduardo Magalhães (LEM), Peixe Angical e Tucuruí foram selecionadas máscaras nas proximidades da barragem (a montante e a jusante), no meio do reservatório, e em áreas mais a montante, mais distantes do reservatório.

O rio Tocantins tem sua origem nos Rios Paranã e Pirineus, em altitudes superiores a 1100 m e possui uma extensão de 2.400 km. Na sua margem direita possui como afluentes os rios Manuel Alves, do Sono e Manoel Alves da Natividade e, pela margem esquerda os rios Araguaia, Santa Teresa e Itacaiúnas (Lima et al., 2004).

Dentre as Usinas Hidroelétricas (UHEs) existentes na bacia do rio Tocantins destacam-se as UHE LEM, Peixe Angical e Tucuruí. A UHE LEM localiza-se entre os municípios de Lajeado e Miracema do Tocantins, seu reservatório ocupa área de 630 km² e possui uma potência instalada de 902,5 MW (ENGETEC, 2015). A UHE Peixe Angical, localizada nos municípios de Peixe e São Salvador do Tocantins a 1.604 km da foz do rio Tocantins, possui um reservatório com área de 294,1 km e potência total instalada de 498,75 MW (ENERPEIXE S.A., 2015). A UHE Tucuruí, com inicialmente 12 unidades geradoras, foi concluída em dezembro de 1992. Posteriormente foi construída a segunda etapa, com mais 11 unidades geradoras, totalizando uma potência instalada de 8.370 MW, sendo concluída em abril de 2007 (ELETRONORTE, 2015).

2.2 Imagens de Satélite

Foram utilizadas imagens do sensor MODIS dos satélites americanos TERRA e AQUA, que tem passagem diária e são fornecidas gratuitamente pela NASA com correção atmosférica e georreferenciadas. Para minimizar a cobertura de nuvens e imagens com geometria de imageamento ruim, foram utilizados os produtos compostos de reflectância da superfície que consistem na 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 melhor geometria. As imagens MOD09Q1 e MYD09Q1 possuem resolução espacial de 250 m e foram utilizadas para analisar as duas bandas radiométricas (1-vermelho e 2-infravermelho), enquanto as imagens MOD09A1 e MYD09A1 possuem 500 metros de resolução e foram utilizadas apenas para extrair as informações sobre a qualidade de processamento (pixel a pixel).

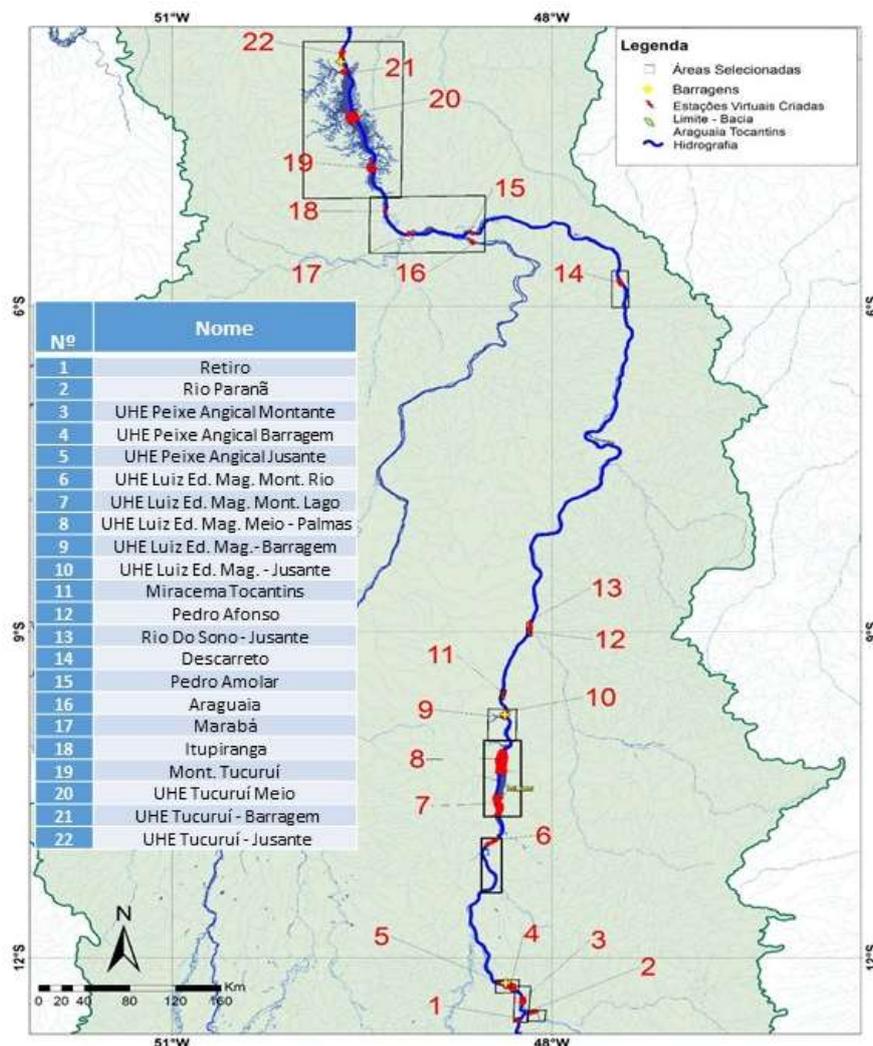


Figura 1. Máscaras definidas no rio Tocantins para obtenção da concentração de sedimentos no rio Tocantins e de afluentes, numeradas de montante para jusante.

2.3 Tratamento das imagens de satélite

Para o processamento automático das imagens MODIS utilizou-se o programa MOD3R (MODis Reflectance Retrieval over Rivers) que extrai os valores de reflectância de superfície da água. Este programa foi desenvolvido pelo IRD (Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento, da França), em linguagem JAVA para extrair automaticamente séries temporais de reflectância das imagens MODIS de corpos hídricos.

2.3 Análise Qualitativa da Concentração de Sedimentos em Suspensão

O comportamento espectral dos sistemas aquáticos continentais está relacionado à concentração de componentes opticamente ativos na água. Com a presença de sedimentos há um aumento da reflectância na faixa do vermelho (0,617 - 0,700 micrômetro) e do infravermelho próximo (0,7 - 1,0 micrômetro). A partir deste comportamento é possível então realizar estudos sobre o fluxo de sedimentos utilizando dados de reflectância obtidos por sensores de satélites. Neste estudo só foi realizada uma análise qualitativa da concentração de sedimento utilizando a banda do vermelho, considerando que o aumento da reflectância na banda do vermelho está relacionada com o aumento da concentração de sedimentos da estação virtual.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dinâmica temporal do fluxo de sedimentos

Foram extraídas séries temporais dos valores de reflectância de superfície na banda do vermelho de 22 áreas no rio Tocantins. A Figura 2 apresenta as séries temporais na banda do vermelho de oito áreas representativas do rio Tocantins. Pode-se observar que a ocorrência dos picos de reflectância se concentra entre os meses de outubro a abril, coincidindo com a estação das chuvas na região. Avaliando os maiores picos de reflectância, verifica-se a propagação dos mesmos entre as áreas estudadas em alguns trechos do rio Tocantins, entretanto a magnitude em que ocorrem é variável. Em dezembro de 2005, como exemplo, ocorreu um pico de reflectância que foi observado nas áreas 3, 4, 6, 7 e 8, no trecho entre a área a montante da UHE Peixe Angical e a cidade Palmas (no meio do reservatório da UHE LEM). Observa-se uma mudança no trecho entre Retiro (área estudada mais a montante do rio) e o reservatório da UHE LEM entre os anos de 2005 e 2006.

Tendo em vista a grande quantidade e variação dos dados, foi extraída a média mensal, mediana, valores mínimos e máximos da reflectância na banda do vermelho para melhor visualização dos padrões de reflectância encontrados nas áreas estudadas, que são apresentados na Tabela 1.

Avaliando a média de reflectância de montante para jusante, nota-se que o rio Paranã deságua no rio Tocantins com uma concentração de sedimentos maior que a encontrada no rio Tocantins em Retiro. Após a desembocadura do rio Paranã no rio Tocantins ocorre um pequeno aumento da concentração de sedimentos no rio Tocantins até a jusante da UHE Peixe Angical. A jusante da UHE Peixe Angical observa-se um aumento de cerca de 70% da reflectância e, na mesma proporção, um aumento da concentração de sedimentos na saída da barragem da UHE Peixe Angical.

O próximo trecho avaliado, nas proximidades da UHE LEM, encontramos pouca variação da reflectância entre o rio e o reservatório da UHE LEM, áreas 6 a 9. Entretanto, assim como na área a jusante da UHE Peixe Angical, ocorre também um grande aumento da reflectância na área a jusante do reservatório, de cerca de 40%, embora menor que no reservatório anterior.

Após este trecho, a variação da reflectância entre as áreas estudadas é menor. Analisando duas áreas nas proximidades da desembocadura do rio do Sono, a montante e a jusante da desembocadura, Pedro Amolar (área 12) e jusante rio do Sono (área 13), nota-se que a média da reflectância no vermelho das duas áreas é bem próxima, mostrando que a concentração de sedimentos do rio do Sono e do rio Tocantins, neste trecho, são semelhantes.

O próximo trecho do rio Tocantins estudado é o trecho em que recebe as águas do rio Araguaia. Pelos valores medianos de reflectância encontrados na área 16, infere-se que a concentração de sedimentos do rio Araguaia foi pouco menor que a do rio Tocantins. Após o encontro das águas observa-se no rio Tocantins, nas proximidades da cidade de Marabá (área 17), valores médios de reflectância próximos ao valor encontrado em Pedro Amolar (área 15), antes da junção dos dois rios. A próxima área estudada, Itupiranga (área 18), possui valores medianos de reflectância bem próximos à área Marabá.

O último trecho avaliado localiza-se nas proximidades da UHE Tucuruí. Observa-se uma grande diminuição do valor da mediana da reflectância nas proximidades do reservatório. Este comportamento é o esperado e já foi estudado por diversos autores que avaliaram a mudança de velocidade de rios nas proximidades dos barramentos com ocorrência de sedimentação. Piscoya (2013, 2013a, 2014), utilizando a mesma metodologia deste trabalho, observou também diminuição dos valores de reflectância no vermelho nas proximidades do barramento da UHE Itaipu, no rio Paraná, e das UHE Jurumirim, Capivara e Chavantes, no rio Paranapanema. Entretanto, a área estudada mais próxima do barramento de Tucuruí, ao contrário do esperado, não possui os menores valores médios e medianos de reflectância.

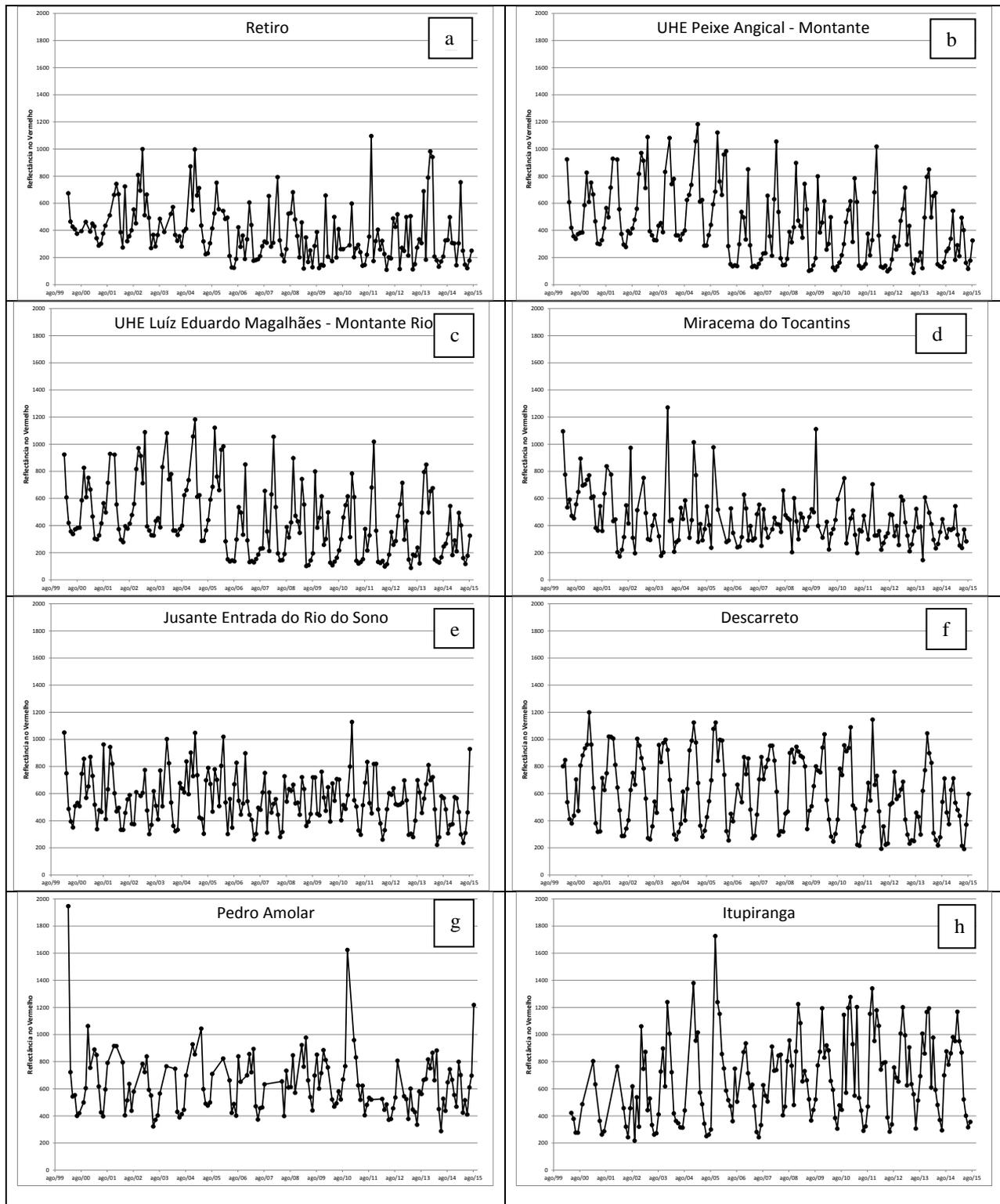


Figura 2. Séries temporais de reflectância na banda do vermelho em oito áreas estudadas no rio Tocantins: a) Retiro; b) UHE Peixe Angical – Montante; c) UHE Luiz Eduardo Magalhães – Montante Rio; d) Miracema do Tocantins; e) Jusante Entrada do Rio do Sono; f) Descarreto.

O reservatório de Tucuruí forma um sistema complexo de braços adentrando em afluentes e, possivelmente esteja ocorrendo chegada de sedimentos destes afluentes que contribuem para o aumento da média da reflectância nas proximidades da barragem. Além disso, são observadas muitas áreas desmatadas nas proximidades do reservatório que contribuem também para o aumento da

concentração de sedimentos. A jusante do barramento Tucuruí (área 22, jusante da UHE Tucuruí), observa-se um aumento da reflectância média, apresentando o mesmo comportamento encontrado a jusante dos reservatórios das UHE Peixe Angical (área 5) e LEM (área 10), embora com menor magnitude.

Segundo o estudo do fluxo de sedimentos na bacia do Tocantins-Araguaia no período de 1981 a 1998 realizado por Lima et al. (2004), o rio Tocantins possui aumentos da concentração de sedimentos no sentido montante para jusante. Entretanto, a análise de reflectância no período de março de 2005 a setembro de 2015 não mostram o mesmo padrão. A construção de diversos barramentos mudou o fluxo de sedimentos no rio Tocantins ocasionando sedimentação principalmente, nas proximidades dos barramentos.

Para uma análise da dinâmica espaço-temporal da reflectância no rio Tocantins foi calculada a média de cada mês para cada uma das áreas estudadas (Figura 3). Observa-se a ocorrência de picos de reflectância entre novembro a março, indicando maior concentração dos sedimentos; e, no período de abril a outubro, uma queda na concentração. Com isso é possível observar a variação sazonal influenciando a geração de picos e decaimentos na concentração dos sedimentos do rio.

3.2 Influência da UHE Peixe Angical no fluxo de sedimentos do rio Tocantins

Para avaliar a influência da UHE Peixe Angical no fluxo de sedimentos foram processadas três áreas: Montante, a 23 km do barramento; na proximidade do barramento (a montante) e a jusante. A análise foi realizada para dois períodos: antes do enchimento do reservatório (agosto de 2000 a dezembro de 2005), e após o enchimento (janeiro de 2006 a agosto de 2015). Segundo ENERPEIXE S.A. (2015) a operação comercial da UHE de Peixe Angical teve início em setembro de 2006. A Figura 4 apresenta a série temporal da reflectância das áreas estudadas na UHE Peixe Angical. Nas três áreas observa-se a influência da construção do barramento no fluxo de sedimentos. Nota-se que os valores de reflectância nas duas máscaras a montante do barramento são bem próximos. Verifica-se um aumento da reflectância na saída do reservatório (máscara a jusante do reservatório) na saída do barramento, o que foi também encontrado por Piscoya (2013a, 2013b, 2014) a jusante de reservatórios nos rios Paranapanema e Paraná. Entretanto, o aumento observado na jusante é superior ao esperado e se deve à entrada de um pequeno afluente do rio Tocantins a jusante da barragem.

Na análise dos dois períodos, observou-se que a maior redução da média da reflectância ocorreu nas proximidades da UHE Peixe Angical – Barragem, com 55% de redução da média da reflectância. Quanto mais distante do barramento, menor é a redução da reflectância no período de 2006 a 2015, quando comparado com o período anterior (2000 a 2005). A última área onde foi observada influência do barramento Peixe Angical foi Pedro Amolar, que fica a cerca de 1.000 km do barramento. Na análise qualitativa dos sedimentos entre os dois períodos foi encontrada uma redução da concentração do fluxo de sedimentos em todas as áreas, mostrando a influência do enchimento do reservatório da UHE Peixe Angical na retenção de sedimentos do rio Tocantins. Com a construção da UHE Peixe Angical, a redução da reflectância na banda do vermelho no rio Tocantins ocorreu em 14 das 22 áreas estudadas, se propagando no rio Tocantins por cerca de 1.100 km: sendo 1.000 km a jusante (do barramento até Pedro Amolar) e 100 km a montante (do barramento até Retiro). Esta redução da reflectância demonstra uma diminuição da quantidade de sedimentos que é maior nas proximidades do barramento, diminuindo à medida que se distancia do mesmo.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram o potencial do uso desta tecnologia para determinação da concentração de material em suspensão e conhecimento da dinâmica dos sedimentos no rio Tocantins.

A carga de sedimentos no rio Tocantins no período de 2000 a 2015 não aumentou ao longo do rio Tocantins em todos os pontos da montante para a jusante, como constatado por Lima et al, (2004) em estudo realizado com dados no período de 1981 a 1998. A variação dos valores de reflectância encontrada no período recente é influenciada pela presença de uma série de usinas hidroelétricas instaladas no rio Tocantins.

Quanto mais próximo dos barramentos, menor é a reflectância; após o barramento ocorre um aumento da reflectância devido a resuspensão de sedimentos na saída da barragem.

Tabela 1. Variáveis estatísticas mensais (média, mediana, valores mínimos e máximos, da reflectância no vermelho das áreas estudadas..

Nº	Área Nome	Reflectância Banda do Vermelho			
		Média	Mediana	Valor Mínimo	Valor Máximo
1	Retiro	360355	296	73	2698
2	Rio Paranã	633	500	111	1820
3	UHE Peixe Angical Montante	413	329	49	1686
4	UHE Peixe Angical Barragem	398	321	26	1582
5	UHE Peixe Angical Jusante	690	548	92	2863
6	UHE Luiz Ed. Mag. Mont. Rio	439	335	98	1822
7	UHE Luiz Ed. Mag. Mont. Lago	493	430	175	1850
8	UHE Luiz Ed. Mag. Meio - Palmas	438	394	74	1857
9	UHE Luiz Ed. Mag.- Barragem	527	416	55	2308
10	UHE Luiz Ed. Mag. - Jusante	630	588	235	1599
11	Miracema Tocantins	461	411	136	1271
12	Pedro Afonso	575	479	146	2325
13	Rio Do Sono - Jusante	527	464	53	2177
14	Descarreto	591	523	138	2332
15	Pedro Amolar	585	526	240	1947
16	Araguaia	536	466	180	1448
17	Marabá	630	536	301	2177
18	Itupiranga	615	511	134	1883
19	Mont. Tucuruí	409	322	28	2380
20	UHE Tucuruí Meio	358	183	18	2763
21	UHE Tucuruí - Barragem	517	443	16	2524
22	UHE Tucuruí - Jusante	518	487	109	1873

A construção da UHE Peixe Angical mudou o comportamento do fluxo de sedimentos no rio Tocantins, diminuindo a concentração de sedimentos nas áreas a montante e a jusante do barramento e diminuindo a carga de sedimentos do rio por mais de 1100 km, sendo 100 a montante e cerca de 1000 a jusante da UHE.

5. REFERÊNCIAS

EDP. **Construção de Peixe Angical segue em ritmo acelerado:** Aproveitamento hidroelétrico e o empreendimento do setor elétrico alinhado com o programa Parceria Público-Privada. 2005. Disponível em: <<http://www.edp.com.br/distribuicao/Paginas/2005/04/Construcao-de-Peixe-Angical-segue-em-ritmo.aspx>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

ELETRONORTE (Org.). **Tucuruí.** Disponível em: <<http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/tucuru/index.html>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

ENERPEIXE S.A. (Tocantins) (Org.). **UHE Peixe Angical.** Disponível em: <<http://www.edp.com.br/geracao-renovaveis/geracao/tocantins/enerpeixe/empresa/institucional/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 22 set. 2015.

ENGETEC (Tocantins). **UHE Luís Eduardo Magalhães, municípios de lajeado e Miracema/TO.** Disponível em: <http://www.engetec.eng.br/index.php?option=com_content&view=article&id=17:uhe-luis-eduardo-magalhaes-municipios-de-lajeado-e-miracemato&catid=5:projetos>. Acesso em: 22 set. 2015.

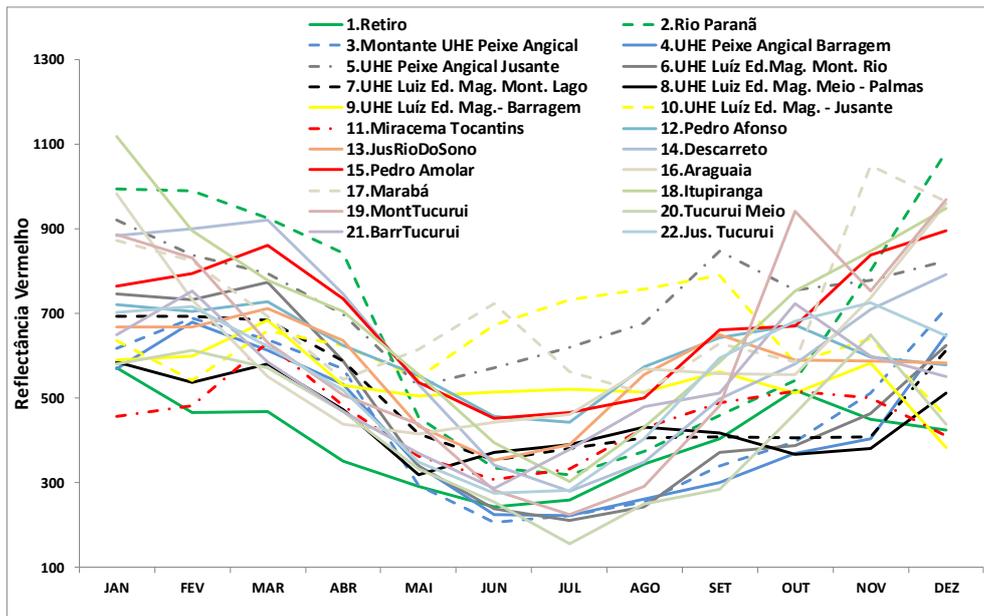


Figura 3. Dinâmica espaço-temporal da reflectância de 22 estações virtuais no rio Tocantins numeradas de montante para a jusante.

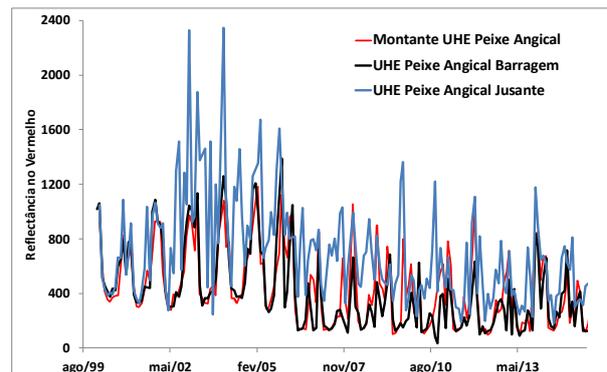
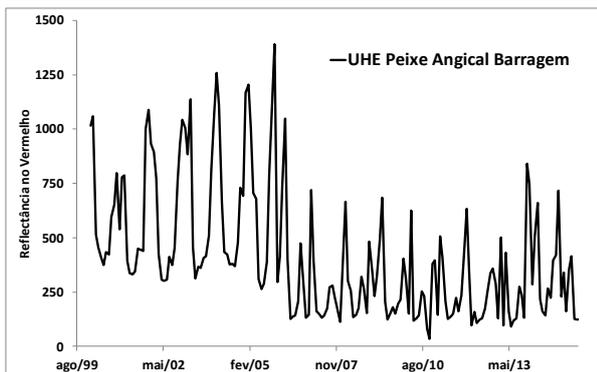


Figura 4. a) Série temporal de reflectância no vermelho no barramento da UHE Peixe Angical; b) Série temporal da reflectância média mensal das três áreas estudadas na UHE Peixe Angical: montante, barragem e jusante.

GUIMARÃES, J. A. **Avaliação da influência do transporte de sedimentos na vida útil das usinas hidrelétricas.** 2009. 18 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://engenharia.anhembi.br/tcc-09/civil-21.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

LIMA, J. E. F. W.; Santos, P. M. C.; Carvalho, N. O.; Silva, E. M. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins.** Planaltina: Embrapa Cerrados; Brasília: ANEEL e ANA, 2004. CD-ROM.

MENDES, A. B. **Análise Sinérgica da vida útil de um complexo hidrelétrico: caso do rio Araguaia, Brasil.** 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

PISCOYA R.C.C.C., Martinez J.M., Lopes W.T.A., Cochonneau G., Nogueira M.G., Ventura D.T., Vieira M.R., Oliveira E., 2013b. **Caracterização do fluxo de sedimentos no reservatório da UHE Jurumirim utilizando dados do sensor espacial MODIS.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20. Bento Gonçalves, 2013. Anais... Bento Gonçalves. p.1 a 8.

PISCOYA R.C.C.C., Martinez J.M., Nogueira M.G., Lopes W.T.A., Cochonneau G., Ventura D., Vieira M.R., Oliveira E., Guimarães V.S. 2013a. **Avaliação do impacto dos reservatórios em cascata sobre o fluxo de sedimentos no rio Paranapanema.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16. Foz do Iguaçu, 2013. Anais... Foz do Iguaçu. p.5896-5903.

PISCOYA, R. C. C. C. et al. **Utilização do sensor espacial MODIS para monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão no reservatório da usina de Itaipu no rio paraná.** 2014.