

CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO DE SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO DA UHE SOBRADINHO UTILIZANDO DADOS DO SENSOR ESPACIAL MODIS

Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya^{12}; Jean-Michel Martinez³; Juliana Farias de Lima Oliveira⁴; Camilla Turon Baran⁴; Tayline Alencar Marques Serafim⁴; Rafael de Araújo Mendes⁴; Cecília Moreira Lima de Lemos⁴; Gérard Cochonneau³; Henrique Llacer Roig⁵; Diogo Olivetti²; Raúl Espinoza Villar⁶; Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes⁷.*

Resumo – A Bacia do Rio São Francisco sofreu alterações significativas no uso e ocupação do solo, o que tem provocado mudanças na dinâmica dos sedimentos da Bacia. A Agência Nacional de Águas – ANA realiza monitoramento por satélite de vários parâmetros hidrológicos em vários rios e reservatórios do país. O objetivo deste trabalho é avaliar o fluxo de sedimentos no reservatório da UHE Sobradinho utilizando dados do sensor MODIS. Para realização deste estudo foram definidas 17 áreas, sendo 16 ao longo do reservatório Sobradinho e uma na estação Morpará, fora da área de influência do reservatório. Foram utilizadas imagens do sensor MODIS para extração da série de reflectância e cálculo da concentração de material em suspensão utilizando equação de calibração com dados espectralradiométricos e de concentração. No reservatório Sobradinho, de 2000 a 2014, as maiores concentrações médias foram encontradas entre outubro a março (41 mg/L), enquanto que as menores ocorreram no período de abril a setembro (16 mg/L). A concentração média do material em suspensão no rio São Francisco, em Morpará, é cerca de cinco vezes superior ao da área mais próxima à barragem de Sobradinho, confirmando, com dados de sensoriamento remoto, a grande deposição de sedimentos ao longo do reservatório Sobradinho.

Palavras-Chave – UHE Sobradinho, Concentração de Material em Suspensão, Sensor Espacial MODIS.

CHARACTERIZATION OF THE SEDIMENT FLOW INTO THE RESERVOIR OF THE SOBRADINHO USING SPATIAL SENSOR MODIS DATA

Abstract – The São Francisco River basin has undergone significant changes in soil use and land occupation, which has modified the sedimentation dynamics of the basin. The National Water Agency of Brazil (ANA) performs satellite hydrological monitoring in several rivers and reservoirs in the country. The aim of this study is to evaluate the flow of sediment in the reservoir of the Sobradinho using MODIS sensor data. To complete this study 17 areas were defined, being 16 areas along the central axis of the Sobradinho reservoir and an upstream station, outside the area of influence of the reservoir. Images from the MODIS sensor were used for extraction of reflectance and calculation of suspended sediment concentration using calibration equation acquired field spectroradiometry. In the Sobradinho reservoir (2000-2014), the largest concentrations were found between October to March (41 mg/L), while the smallest occurred in the period from April to September (16 mg/L). The average concentration of suspended material in the São Francisco River, in Morpará, is about five times that of the nearest area to the Sobradinho dam, confirming, with remote sensing data, the major sediment deposition along the Sobradinho reservoir.

Keywords – Sobradinho Reservoir; Sensor MODIS.

¹ Especialista de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas, Setor Policial, área 5, Quadra 3, Bloco L, Brasília-DF; rita.piscoya@ana.gov.br.

² Aluno do programa de pós-graduação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília; di_olivetti@hotmail.com

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

⁴ Estagiário da Agência Nacional de Águas, Setor Policial, área 5, Quadra 3, Bloco L, Brasília-DF. camilla.baran@ana.gov.br; juhfarias28@gmail.com; tayline.serafim@ana.gov.br; pamella.goncalves@ana.gov.br; rafael.araujo@ana.gov.br; ceciliamoreiralima1@gmail.com

⁵ Professor do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB); roig@unb.br.

⁶ Professor da Universidade Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Peru.: respinozavillar@gmail.com

⁷ Professor da Universidade Federal de Alfenas: paulo.menezes@unifal-mg.edu.br.

* Rita de Cássia Cerqueira Condé De Piscoya

1. INTRODUÇÃO

A Bacia do Rio São Francisco sofreu alterações significativas no uso e ocupação do solo, o que tem provocado mudanças na dinâmica dos sedimentos da Bacia. Segundo os resultados da modelagem realizada por Creech et al. (2015), a taxa de assoreamento de sedimentos no Rio São Francisco e principais afluentes aumentou em aproximadamente 20 vezes desde a Pré-Colonização Européia da bacia (de aproximadamente 1,25 milhão para 23 milhões de toneladas por ano), o que tem contribuído com os danos da navegação atual devido aos bancos de sedimentos no canal de navegação do Rio São Francisco.

Porém, com a construção de reservatórios em cascata, o rio São Francisco transformou-se de um sistema de alta turbidez à transparente, devido à retenção de matéria nos reservatórios ao longo da cascata, com uma redução de 94% da carga fluvial atual de material particulado suspenso, no baixo São Francisco, no trecho entre as cidades de Propriá (SE) e Porto Real do Colégio (AL), em comparação a 1970 (Medeiros, 2007). Com a construção de uma série de barragens no médio-baixo Rio São Francisco, que se inicia em Sobradinho, uma grande parte dos sedimentos que anteriormente chegava à zona estuarina e costeira é retida nesses reservatórios. Além do mais, como essas barragens se localizam em ambiente climático semi-árido, ocorre apreciável perda de água dos reservatórios por evaporação. A reposição de água e materiais por tributários ao longo deste trecho até a foz é muito baixa (Medeiros, 2003).

Apesar destes estudos pouco se sabe sobre o que acontece com a descarga sólida ao longo da cascata de reservatórios. Uma alternativa para auxiliar no entendimento deste processo hidrossedimentológico é o uso de imagens de satélite. O grupo de pesquisa de Hidrologia Espacial, envolvendo várias instituições e liderado pela Agência Nacional de Águas – ANA e o Institut de Recherche pour le Développement – IRD, da França, desenvolveu nos últimos anos atividades pioneiras que demonstram a importância dos dados de sensoriamento remoto para o monitoramento dos recursos hídricos, além de representar importante avanço no monitoramento da quantidade e da qualidade das águas do Brasil. A partir desta experiência, a ANA construiu um procedimento para realizar monitoramento por satélite do nível de rios, inclusive fora das fronteiras brasileiras, acompanhando assim os processos de eutrofização em grandes açudes da região Nordeste, fluxos de concentração de sedimentos nos rios Amazonas, Solimões, Paraguai e São Francisco e os fluxos de turbidez no rio Paranapanema. Os dados do monitoramento hidrológico a partir de dados espaciais realizado pela ANA são disponibilizados no primeiro portal desenvolvido no mundo por uma agência de águas: HidroSat (Carvalho et. al., 2015).

Piscoya et al. (2013 e 2014), com a mesma metodologia deste trabalho, estudaram o fluxo de sedimentos nos reservatórios da UHE Jurumirim, no rio Paranapanema, e da UHE Itaipu, no rio Paraná. Os resultados obtidos demonstraram o potencial do uso do sensor MODIS para determinação da concentração de material em suspensão e de turbidez e conhecimento da dinâmica dos sedimentos nas áreas de estudo, possibilitando a implementação do monitoramento automatizado no HidroSat.

O objetivo deste trabalho é avaliar o fluxo de sedimentos no reservatório da UHE Sobradinho utilizando dados do sensor MODIS. Como objetivos específicos temos: 1) determinar o comportamento da concentração de sedimentos em suspensão ao longo do reservatório; e 2) comparar as concentrações do reservatório Sobradinho com as do rio São Francisco em área a montante fora da influência do reservatório.

2. ETAPAS E METODOS

A realização deste trabalho seguiu os procedimentos já realizados em outros estudos do grupo de pesquisa em Hidrologia Espacial, o qual é simplificada e dividido em: caracterização da área, obtenção das imagens, processamento das imagens e estimativa da concentração de sedimentos.

2.1 Caracterização da área de estudo

O Rio São Francisco, principal rio da região nordeste, nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, percorrendo mais de 2.700 km de sua nascente até o Oceano Atlântico, entre Alagoas e Sergipe. Os principais afluentes do São Francisco que pertencem ao regime perene são: Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande, pela margem esquerda, e das Velhas, Jequitaí e Verde Grande, pela margem direita.

Segundo a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF (CHESF, 2017), a UHE Sobradinho localiza-se no estado da Bahia, a uma distância de 40 km a montante das cidades de Juazeiro/BA e Petrolina/PE, começou a ser construída em junho de 1973 e iniciou sua operação em novembro de 1979. O reservatório de Sobradinho tem cerca de 320 km de extensão, com uma superfície de espelho d'água de 4.214 km² e uma capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 392,50 m, constituindo-se no maior lago artificial do mundo. Devido a elevada relação área superficial/profundidade média do reservatório da UHE Sobradinho, estima-se que a perda de água por evaporação seja da ordem 240m³/s (ANA, 2008).

Para realização deste estudo foram definidas 17 áreas, sendo 16 áreas (máscaras) de 10 km de comprimento ao longo do eixo central do reservatório (Figura 1), e uma máscara nas proximidades da estação Morpará, fora da área de influência do reservatório, a cerca de 435 km a montante do barramento da UHE Sobradinho, última estação da ANA no rio São Francisco antes do reservatório de Sobradinho. As 16 máscaras definidas no barramento de Sobradinho foram numeradas de jusante para a montante, sendo a área 1 definida entre o barramento e 10 km a montante do mesmo (ponto médio a 5 km), e a área 16 a mais distante do barramento, entre 150 e 160 km de distância do barramento. O presente estudo aborda apenas os 160 km mais próximos ao reservatório, dos 320 km de extensão do reservatório. A metade mais a montante do reservatório será abordada em outro estudo.



Figura 1. Máscaras criadas no reservatório da UHE Sobradinho.

2.2 Imagens de satélite

Para a realização deste estudo foram utilizadas imagens do sensor espacial MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA, em especial os produtos compostos de reflectância da superfície de oito dias (Nível 3) MOD09 e MYD09, fornecidas gratuitamente pela NASA. O período de análise foi de 26/02/2000 a 17/11/2014. As imagens MOD09Q1 e MYD09Q1 possuem resolução espacial de 250 m e foram utilizadas para analisar a reflectância das bandas radiométricas (1-vermelho e 2-infravermelho). Para extração das informações sobre a qualidade do processamento foram utilizadas as imagens MOD09A1 e MYD09A1 que possuem 500 metros de resolução.

2.3 Tratamento das imagens

Para o processamento das imagens foi utilizado o programa MOD3R (MODIS Reflectance Retrieval over Rivers), desenvolvido pelo IRD em linguagem JAVA e disponível em <http://www.ore-hybam.org/index.php/eng/Software/Getmodis-Mod3r>. O algoritmo do programa permite a determinação precisa dos pixels de água pura em uma imagem ao longo do tempo, a partir da extração de séries temporais de reflectância das imagens MODIS dos corpos hídricos.

2.4 Estimativa da concentração de sedimentos

Para a estimativa da concentração de material em suspensão foi utilizada a equação de calibração que relaciona concentração de material em suspensão e dados espectroradiométricos obtidos com o radiômetro da TRIOS em diversas campanhas realizadas no reservatório da UHE Três Marias, por Meneses (2013), e pela primeira autora deste artigo, no trecho Pirapora a Barra, do rio São Francisco, e nos seguintes afluentes: rio das Velhas, rio Paracatu, rio Corrente, rio Grande e rio Urucuiá. Os dados hiperespectrais de campo foram utilizados para simular as bandas MODIS e calcular a equação de calibração para obtenção dos valores de .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dinâmica temporal de sedimentos

Foram extraídas séries temporais da concentração de material em suspensão das 16 áreas analisadas no reservatório da UHE Sobradinho. A série temporal é composta pela média mensal dos valores de reflectância que foram convertidos em concentração de material em suspensão aplicando-se a equação de calibração.

A Figura 2 apresenta a média mensal das séries temporais de concentração de material em suspensão em quatro áreas do reservatório da UHE Sobradinho. Os menores valores de concentração de material em suspensão foram encontrados na área mais próxima ao barramento da UHE Sobradinho (área 1). O comportamento esperado, encontrado em outros estudos realizados com a mesma metodologia nos reservatórios de Jurumirim (Piscoya 2013), Itaipu (Piscoya, 2014) e Três Marias (Menezes, 2013; Pinto et. al., 2014), é um aumento dos valores da concentração de material de suspensão de jusante para montante. Com exceção de alguns meses, este padrão também foi encontrado no reservatório Sobradinho.

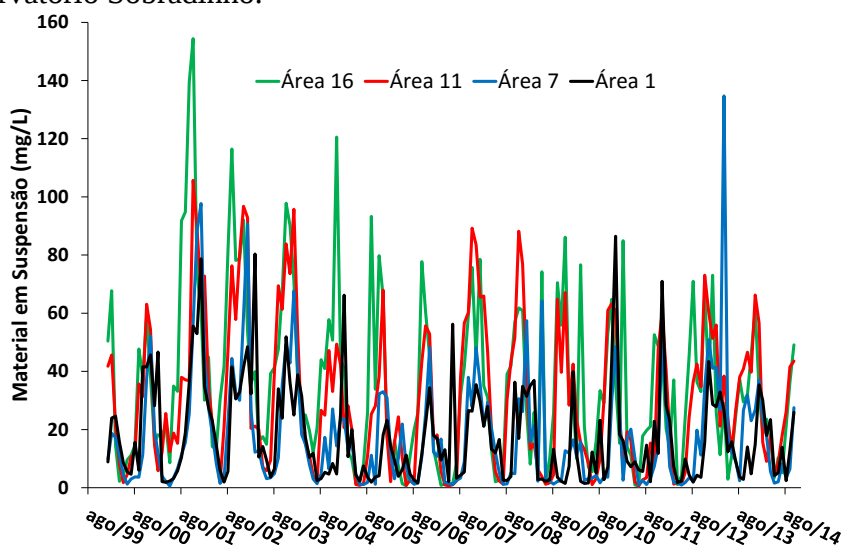


Figura 2. Série temporal de material em suspensão em quatro áreas do reservatório da UHE Sobradinho.

A Tabela 1 mostra os valores médios, medianos, mínimos e máximos da reflectância no infra-vermelho e da concentração de material em suspensão da série temporal. Cabe destacar que as imagens utilizadas são imagens compostas formadas pelos pixels de melhor qualidade adquiridos em um período de oito dias, consistindo na análise pixel a pixel de imagens diárias, onde são analisadas oito imagens consecutivas e escolhido o pixel da imagem com melhor qualidade para a composição, levando em consideração a menor cobertura ou sombra de nuvens, a melhor geometria de aquisição da imagem e a menor concentração de aerossóis. Novamente os valores calculados para o reservatório Sobradinho nos mostram um aumento da reflectância e da concentração da jusante para a montante. Além disso, observa-se diferenças pequenas entre os valores de máscaras consecutivas, diferentemente do observado em reservatórios não tão grandes, como o de Jurumirim e de Itaipu (Piscosa 2013, 2014).

Tabela 1. Média, mediana e valores mínimos e máximos da reflectância na banda do infra-vermelho e da concentração de material em suspensão calculada para o período fevereiro de 2000 a novembro de 2014.

Área	Distância da Barragem (km)	Reflectância no Infra-Vermelho				Concentração de material em Suspensão (mg/L)			
		Média	Mediana	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Mediana	Valor Mínimo	Valor Máximo
1	5	120	67	2	1425	18	9	0	233
2	15	80	37	5	980	14	7	0	158
3	25	119	62	4	1831	18	9	0	304
4	35	138	86	4	1051	21	12	0	170
5	45	141	84	3	1916	21	12	0	319
6	55	176	93	2	1934	27	13	0	322
7	65	122	57	2	1856	18	9	0	308
8	75	174	68	2	1711	34	12	0	283
9	85	222	125	2	1977	34	18	0	329
10	95	180	123	3	1862	27	18	0	309
11	105	202	147	3	955	31	21	0	153
12	115	225	169	3	1281	34	25	0	209
13	125	267	224	3	1393	41	33	0	228
14	135	266	231	4	1000	41	34	0	161
15	145	266	211	2	1904	41	31	0	316
16	155	235	176	3	1875	36	26	0	311
Morpará	435	574	472	176	1649	91	73	26	272

3.2 Dinâmica espaço-temporal dos sedimentos no reservatório de Sobradinho

A Figura 3 apresenta a média mensal das séries temporais de concentração de material em suspensão de um período de 13 anos em 16 áreas do reservatório da UHE Sobradinho. As médias mensais de concentração mostram que: 1) os maiores valores de concentração ocorrem no período de outubro a março, com uma concentração média de 41 mg/L e uma diferença média de concentração entre a área mais próxima e mais distante do barramento de 28 mg/L; 2) os menores valores de concentração ocorrem no período de abril a setembro, com uma concentração média de 16 mg/L e diferença média de concentração entre a área mais próxima do barramento e a mais a montante de cerca de 10 mg/L; 3) A concentração média da área mais próxima do barramento é de 18 mg/L enquanto que a da área mais a montante do barramento de Sobradinho é de 36 mg/L; 4) há aportes de sedimentos em algumas áreas em decorrência da entrada de afluentes.

Os valores médios mensais de concentração obtidos na análise anterior foram plotados em função da distância das 16 áreas analisadas no reservatório de Sobradinho (Figura 4). Observou-se que: 1) em todos os meses, os menores valores de concentração são encontrados mais próximos ao barramento; 2) houve diminuição da concentração em função da distância do reservatório, no sentido montante-jusante; 3) ocorreu aporte de sedimentos em algumas áreas modificando o padrão geral

encontrado; 4) A amplitude de variação dos valores de concentração média nas áreas mais a montante é maior que as das áreas mais próximas ao reservatório: enquanto a concentração média nas áreas mais próximas do reservatório (áreas de 1 a 4) variou de 5 a 38 mg/L, nas quatro áreas mais distantes (áreas 13 a 16) a concentração média variou de 9 a 81 mg/L.

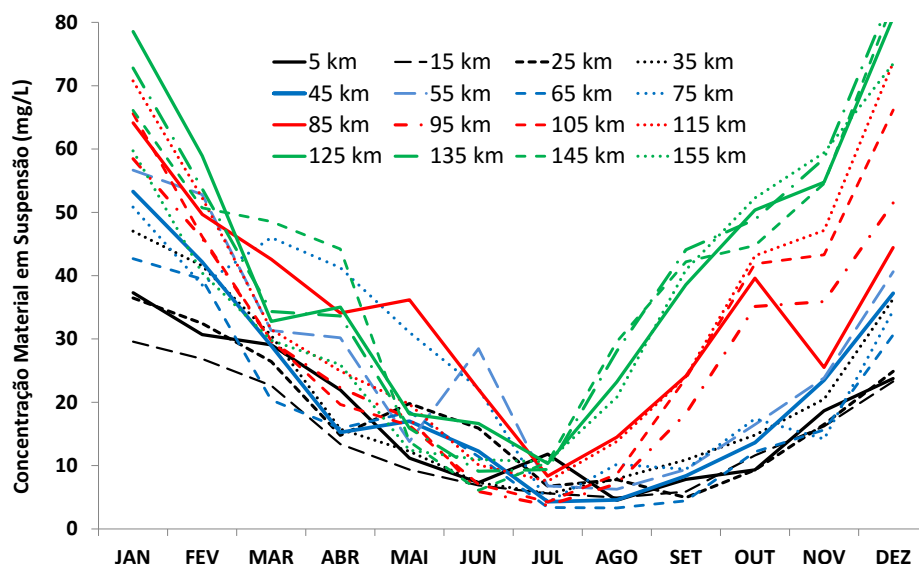


Figura 3. Dinâmica espaço-temporal do material em suspensão no reservatório da UHE Sobradinho.

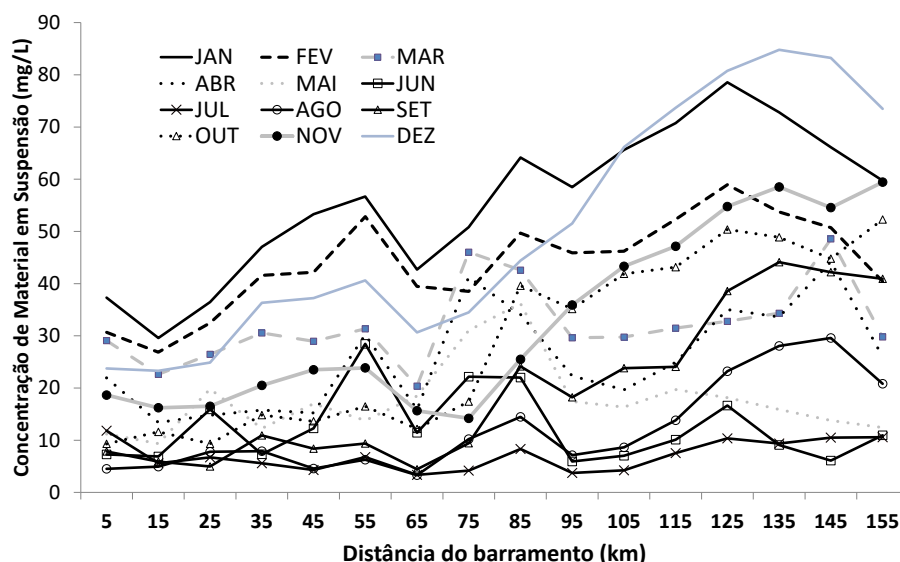


Figura 4. Dinâmica espacial da concentração de material em suspensão no reservatório da UHE Sobradinho.

3.3 Material em suspensão no Rio São Francisco e no Reservatório de Sobradinho

A Figura 5 apresenta comparação do material em suspensão do reservatório de Sobradinho com a área da estação da ANA (no rio São Francisco) mais próxima ao reservatório de Sobradinho e fora da área de influência do mesmo. Conforme mostra a Tabela 1, a concentração média do material em suspensão da área Morpará, que tem valor médio de 91 mg/L) é de cerca de cinco vezes superior ao da área mais próxima à barragem de Sobradinho, que tem concentração média de 18 mg/L. Desta forma, o estudo confirma, com dados de sensoriamento remoto, a grande deposição de sedimentos ao

longo do reservatório Sobradinho. De acordo com Oliveira (2009), com 98% da bacia controlada por barragens, o Rio São Francisco foi drasticamente alterado em função da cascata de barragens instalada em seu de leito, reduzindo o potencial de transporte de matéria e o padrão de sazonalidade de descarga fluvial. A pluma de turbidez do Rio São Francisco no período anterior à construção das barragens (principalmente as barragens de Sobradinho, Itaparica e Xingo) apresentava um potencial de dispersão de matéria bastante expressivo durante os períodos de alta vazão, enquanto que nos períodos de baixa vazão, a pluma do RSF tinha seu alcance reduzido e restrita a região costeira.

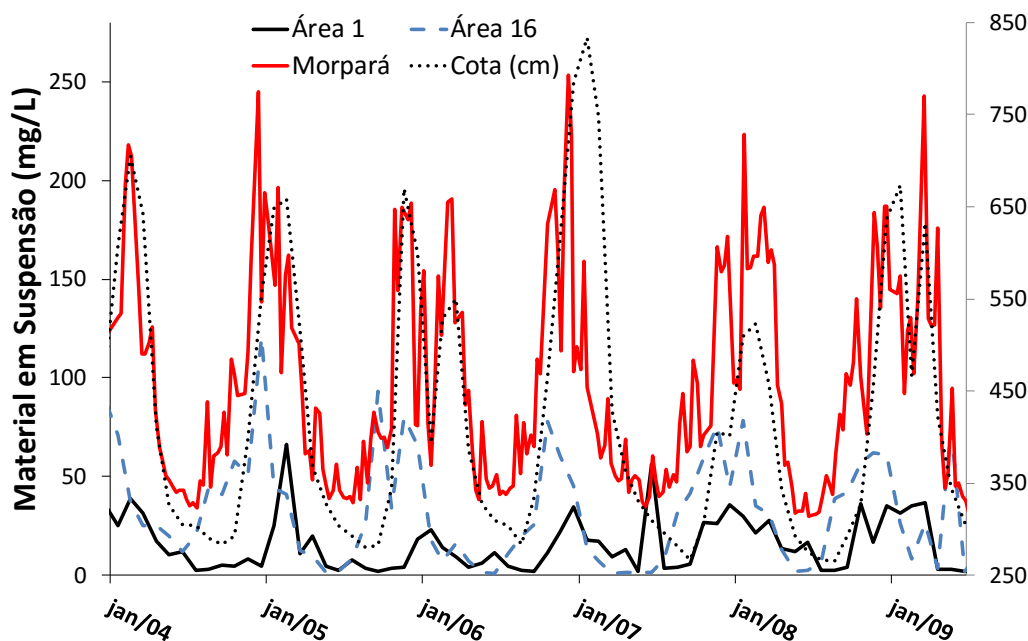


Figura 4. Comparação do material em suspensão do reservatório e da área Morpará com os valores de cota da estação Morpará (código 46360000).

Apesar da variação de cotas no reservatório ser influenciada pela operação do reservatório, é possível verificar a influência do regime de chuvas na quantidade de material em suspensão no reservatório. A Figura 4 mostra que a concentração de material em suspensão no reservatório responde à elevação de cota da estação Morpará. 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 e na turbidez. Após este pico, as concentrações de sedimentos e a turbidez diminuem, devido à diluição que ocorre com o aumento do volume d'água disponível. As menores concentrações de sólidos em suspensão estão associadas aos menores volumes de água no reservatório.

4. CONCLUSÃO

Os valores calculados de material em suspensão a partir de imagens de satélite para o reservatório Sobradinho mostram um aumento da reflectância e da concentração de material em suspensão da jusante para a montante, sendo observadas diferenças pequenas entre os valores de áreas consecutivas, diferentemente do observado em reservatórios não tão grandes, como o de Jurumirim e de Itaipu.

No reservatório Sobradinho, no período de 2000 a 2014, as maiores concentrações médias foram encontradas entre outubro a março (41 mg/L), enquanto que as menores ocorreram no período de abril a setembro (16 mg/L). A diferença média da concentração entre a área mais próxima do barramento (área 1) com a mais distante (área 16) é em média de 28 mg/L de outubro a março, e de

10 mg/L, de abril a setembro. A concentração média da área mais próxima do barramento é de 18 mg/L, enquanto que a da área mais a montante do barramento de Sobradinho é de 36 mg/L.

A comparação da concentração do material em suspensão do reservatório de Sobradinho com a do rio São Francisco na estação Morpará, fora da influência do reservatório, mostra que a concentração média do material em suspensão da área Morpará, que tem valor médio de 91 mg/L, é de cerca de cinco vezes superior ao da área mais próxima à barragem de Sobradinho, que tem concentração média de 18 mg/L, confirmando, com dados de sensoriamento remoto, a grande deposição de sedimentos ao longo do reservatório Sobradinho.

REFERÊNCIAS

ANA – Projeto GESF - ANA/GEF/PNUMA/OEA. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gefsf/>>. Acesso em 9 jun. 2017.

CARVALHO, J.C.; COCHONNEAU, G.; PISCOYA, R.C.C.C.; MARTINEZ, J.M.; SOUZA, E.A.; ANTUNES, M.A.; VENTURA, D.V.; OLIVEIRA, E.; LOPES, W.T.A.; GUIMARÃES, V.S.; 2015. HidroSat – Sistema integrado para gerenciamento, processamento e difusão de dados hidrológicos obtidos a partir de monitoramento por satélites. *In Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, NOV. 2015.

CHESF. Descrição do aproveitamento de Sobradinho. Disponível em http://www.ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=144&Itemid=423. Acesso em 10 jun. 2017.

CREECH, C.T., BRITO, R.S.; SELEGAN, J.P., MILLER, C. (2015). Anthropogenic impacts to the sediment budget of São Francisco River navigation channel using SWAT. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3).

MEDEIROS, P.R.P.; KNOPPERS, B.A.; SANTOS JÚNIOR, R.C.; SOUZA, W.F.L.; (2007). Aporte fluvial e dispersão da matéria particulada em suspensão na zona costeira do estuário do rio São Francisco (SE/AL). *Geochimica Brasiliensis*, 21(2):209-28.

MEDEIROS, P.R.P.(2003).Aporte fluvial, transformação e dispersão da matéria em suspensão e nutrientes no estuário do Rio São Francisco, após a construção da Usina Hidroelétrica do Xingó (AL/SE).Tese de Doutorado.Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense,184 p.

MENEZES, P.H.B.J. (2013). Estudo Espaço-Temporal da Dinâmica de Fluxo de Sedimentos a partir das Propriedades Ópticas do Reservatório de Três Marias - MG. Tese de doutorado Nº 14. UnB. 114p.

PINTO, C. T.; MENEZES, P. H. B. J. ; MARTINEZ, Jean-Michel ; ROIG, H. L. ; VILAR, R. A.E. (2014) . Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18 (Online), 507-516.

OLIVEIRA, E.N. (2009). Impacto de barragens sobre a dispersão de matéria e a sustentabilidade da pluma costeira do rio São Francisco (AL/SE): Análise espacial e temporal por sensoriamento remoto.

PISCOYA, R.C.C.C.; MARTINEZ, J.M.; LOPES, W.T. A; COCHONNEAU, G.; NOGUEIRA, M.G., VENTURA, D.; VIEIRA, M.R.; OLIVIERA, E. (2013). Caracterização do fluxo de sedimentos no reservatório da UHE Jurumirim utilizando dados do sensor espacial MODIS. *In Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, Nov. 2013.

PISCOYA, R.C.C.C.; MARTINEZ, J.M.; LOPES, W.T. A; COCHONNEAU, G.; VILLAR, R.E.; VENTURA, D.; VIEIRA, M.R.; OLIVIERA, E. (2014). Utilização do sensor espacial MODIS para monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão no reservatório da Usina de Itaipu no Rio Paraná. *In Anais do XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*, João Pessoa, Nov. 2014.