



ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE REFLECTÂNCIA DAS IMAGENS MODIS NO ESTUÁRIO DO RIO SAO FRANCISCO, AL/SE, NORDESTE DO BRASIL.

*Ilanna de Souza Rêgo*¹; *Rita de Cássia Cerqueira Condé de Piscocoy*²; *Henrique Llacer Roig*³;

Resumo – As descargas dos rios possuem um importante papel nos ciclos hidrológicos e na estabilidade termodinâmica dos oceanos e tem uma influência significativa nos ciclos biogeoquímicos. O aporte continental leva para a região costeira massas de água flutuante com quantidades variadas de material particulado em suspensão (MPS), podendo gerar alta concentração de material orgânico e inorgânico para as águas costeiras. O monitoramento espaço-temporal automatizado da descarga de sedimentos em suspensão em corpos d'água utilizando imagens do sensor espacial MODIS permite o monitoramento de grandes áreas a baixo custo. O objetivo deste trabalho é aplicar a metodologia desenvolvida no âmbito do projeto ANA/IRD, avaliando o fluxo de sedimentos na foz do rio São Francisco (RSF) a partir de gerados pelo sensor MODIS (plataforma AQUA e TERRA). Foram analisados dados de reflectância de três máscaras na interface rio-oceano da foz do RSF. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o uso desta tecnologia tem um alto potencial para determinação da concentração de material em suspensão e conhecimento da dinâmica dos sedimentos dentro do estuário, possibilitando, após uma calibração fina do método com dados de campo, a implementação do monitoramento automatizado de sedimentos.

Palavras-Chave – rio São Francisco, Concentração de Sedimentos em Suspensão, Sensor Espacial MODIS.

SPACE-TIME ANALYSIS OF REFLECTANCE OF IMAGES IN MODIS ESTUARY RIO SAO FRANCISCO, AL / SE, NORTHEASTERN BRAZIL.

Abstract- The discharge of rivers play an important role in hydrological cycles and thermodynamic stability of the oceans and has a significant influence on biogeochemical cycles. The investment brings to the continental coastal region masses of floating water with varying amounts of suspended particulate matter (SPM), which can generate high concentration of organic and inorganic material for coastal waters. The automated space-time monitoring of the discharge of suspended sediments in water bodies using images from space MODIS sensor allows monitoring of large areas at low cost. The objective of this work is to apply the methodology developed under the ANA / IRD project, evaluating the flow of sediments at the mouth of the River (RSF) generated from the MODIS sensor (AQUA and TERRA platform). Were analyzed data from reflectance of three masks in river-ocean interface from the mouth of the RSF. The results obtained data were analyzed in this study and show that the use of this technology has a high potential for determining the concentration of suspended material and knowledge of sediment dynamics within estuary, enabling, after a fine calibration of the method with field data, the implementation of automated monitoring of sediment.

Keywords – São Francisco river, sediment concentration in suspension, Space Sensor MODIS.

1- Aluna do programa de pós-graduação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB): ilanna_rego@hotmail.com

2- Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA): rita.piscocoy@ana.gov.br

Professor do programa de pós-graduação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB): roig@unb.br



1. INTRODUÇÃO

A variabilidade da concentração material particulado em suspensão (MPS) que aporta os oceanos pode influenciar vários processos na coluna d'água, dentre eles: produtividade primária (devido à dificuldade de penetração da luz na coluna d'água); transferências biogeoquímicas entre a coluna d'água e o substrato marinho; qualidade da água (devido à dispersão de agentes patológicos e poluentes adsorvidos em MPS); taxa de sedimentação no substrato marinho e o fluxo de sedimentos ao longo das praias. (Oliveira 2009). Com o surgimento de sensores remotos embarcados em satélites houve uma difusão da utilização da tecnologia de sensoriamento remoto facilitando a aquisição séries temporais apropriadas ao estudo da variabilidade de MPS, fornecendo dados sobre os sedimentos em suspensão na coluna d'água e facilitando o monitoramento das águas a partir do comportamento espectral de seus componentes (Moraes, 2013; Piscoya 2013).

O comportamento espectral dos sistemas aquáticos está relacionado com a concentração de componentes opticamente ativos na água, que podem ser partículas inorgânicas e orgânicas em suspensão; componentes orgânicos em solução e pigmentos fotossintetizantes. A dificuldade o monitoramento espaço-temporal em ambientes aquáticos é um desafio que tem motivado diversas pesquisas sobre a aplicação de sensores remotos para este tipo de análise. (Martinez *et al.*, 2009; Menezes, 2013). O monitoramento automatizado de parâmetros hidrológicos utilizando imagens do sensor espacial MODIS permite o monitoramento de grandes áreas a baixo custo. A Agência Nacional de Águas – ANA e o *Institut de Recherche pour Le Développement* – IRD trabalham em parceria no projeto intitulado “Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias (Quantidade e Qualidade) - Projeto “MEG-HIBAM”, onde foram desenvolvidas metodologias para avaliação de sedimentos, turbidez e clorofila-a, utilizando dados do sensor espacial MODIS (Piscoya et al., 2013).

A literatura apresenta vários trabalhos que tratam da aplicabilidade dos sensores remotos na análise de concentrações de sedimentos suspensos em águas. Esta metodologia foi testada inicialmente na Bacia na Bacia Amazônica (Martinez *et al.*, 2009; Villar, 2013), e posteriormente ampliada para reservatórios do Nordeste (Ventura, 2013) e de Três Marias-MG (Menezes, 2013), bem como para os reservatórios do Rio Parapanema (Piscoya et al., 2013a e 2013b) e de Itaipu (Piscoya et al., 2014). Trata-se de um procedimento robusto, viabilizando assim a implementação do monitoramento sedimentológico automatizado por satélite (HIDROSAT). No entanto, este procedimento ainda não foi testado para a Foz dos rios brasileiros. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é aplicar esta metodologia na avaliação do fluxo de sedimentos na foz do RSF utilizando a série histórica do sensor MODIS, para o período de 2000 a 2014.

2. METODOLOGIA DO TRABALHO

2.1 Área de estudo

O rio São Francisco (RSF) nasce em Minas Gerais a 1.800 m de altitude e percorre uma extensão aproximada de 2.700 km, atravessando vários estados até desembocar no Oceano Atlântico Sul, na divisa entre os Estados de Sergipe e Alagoas, nordeste do Brasil (Lat. 10° 36' S e Long. 36° 23' W) (Pereira et al., 2007; Medeiros *et al.*, 2007; Gomes et al., 2010). No Baixo São Francisco (onde se localiza o estuário) o clima é bastante influenciado pelo regime pluviométrico, com estação chuvosa que ocorre de maneira mais expressiva nos meses de maio a julho (Medeiros *et al.*, 2001).

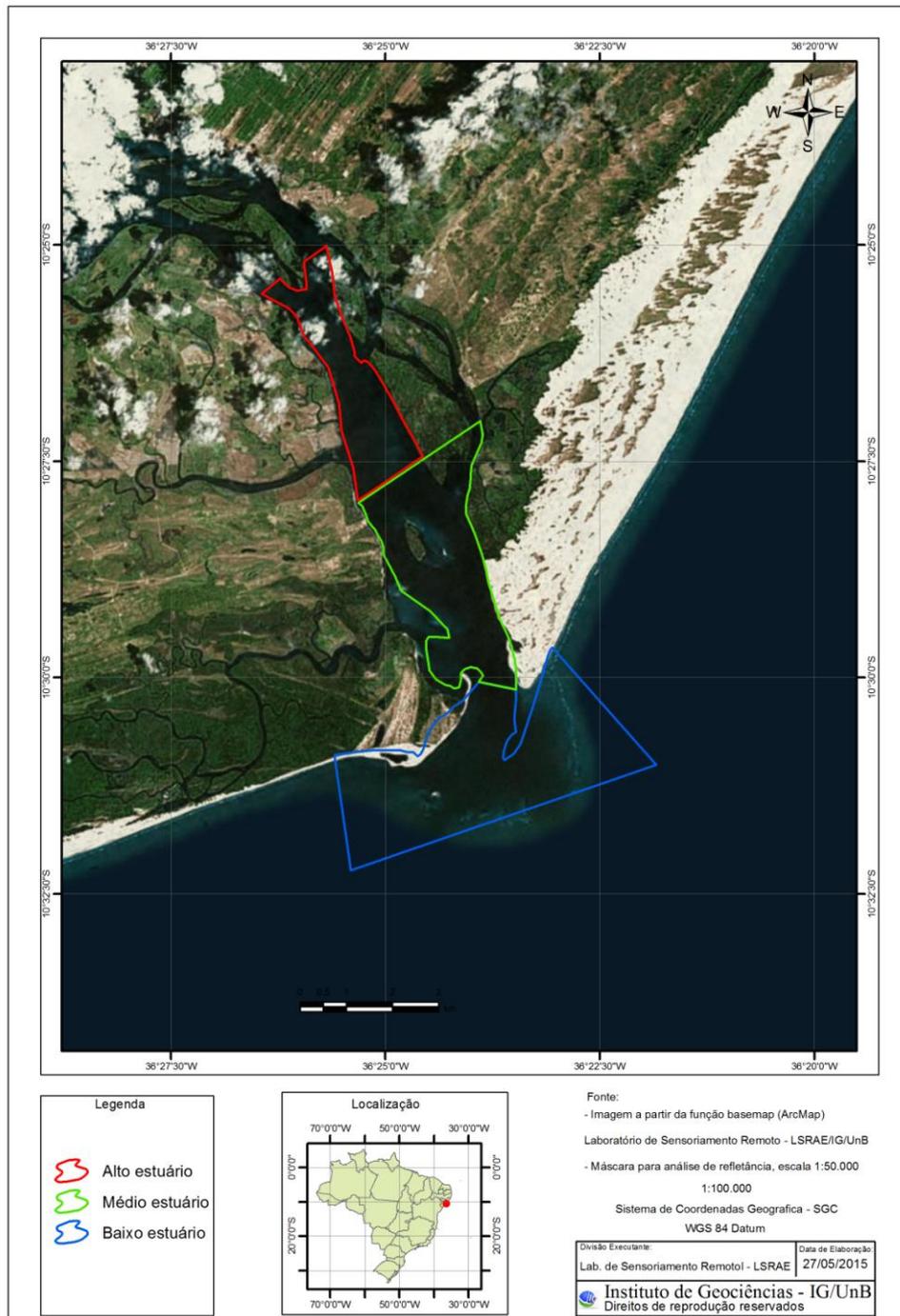


Figura 1. Máscaras criadas na foz do RSF.

Em condições normais de vazão (média anual de $2.850 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), o estuário chega a 6 km, porém, em épocas de baixa vazão ocorre uma maior intrusão salina (Medeiros, 2014). Considerando a influência da maré no estuário, foram definidas três áreas para processamento das imagens de satélite: uma máscara na boca do estuário do RSF (Baixo Estuário) e duas máscaras a montante, denominadas Médio Estuário e Alto Estuário (Figura 1).



2.2 Imagens de Satélite

Para este estudo foram adquiridos os produtos de reflectância da superfície MOD09 e MYD09 das imagens do sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA. Estes produtos oferecem estimativas da reflectância de superfície, são corrigidos dos efeitos atmosféricos e georreferenciados. As imagens MOD09Q1 e MYD09Q1 possuem resolução espacial de 250 m e foram utilizadas para analisar as duas bandas radiométricas (1-vermelho), enquanto as imagens MOD09A1 e MYD09A1 possuem 500 metros de resolução e foram utilizadas para extrair as informações sobre a qualidade de processamento. As imagens utilizadas são composições de oito dias 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 a melhor geometria. Para cada máscara foram utilizadas 675 imagens do sensor espacial TERRA, para o período de 2000 a 2014, e 569 imagens do sensor espacial AQUA, para o período de 2002 a 2014.

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. Neste trabalho, foi utilizada a reflectância na banda 1 (vermelho) para obter informações do comportamento de sedimentos em suspensão ao longo do estuário do RSF. Para verificação da influência do regime hidrológico neste comportamento foram utilizados dados de cota da última estação fluviométrica do RSF, Estação Brejo Grande (código 49775000) que se localiza a cerca de 16 km da foz do RSF.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista a grande quantidade e variação dos dados, foi extraída a média mensal da reflectância para melhor visualização dos dados. A Figura 2 mostra a série temporal de reflectância das três áreas selecionadas ao longo do estuário, desde o Baixo Estuário (foz do RSF), até o fim da influência de maré (ponto médio a 12,5 km da Foz), no período de fevereiro de 2000 a novembro de 2014. Observando as maiores médias anuais do Baixo Estuário é possível perceber que esta área apresenta maiores reflectâncias a partir de 2010 e mostra uma maior contribuição de sedimentos próximo a foz a partir deste período. No período analisado a média da cota do RSF na Estação Brejo Grande foi de 342 cm, com um desvio padrão de 39 cm e coeficiente de variação de 11 %. Esta baixa variação de cotas provavelmente é decorrente do regime hidrológico controlado pelos diversos barramentos construídos no RSF. Verifica-se que a variação de reflectância acompanha a variação de cotas de forma proporcional, mostrando a estreita relação entre o regime hidrológico e o fluxo de sedimentos (como, por exemplo, os picos de cota de fevereiro de 2004 e 2007 que são acompanhados pelos picos de reflectância observados no mesmo período).

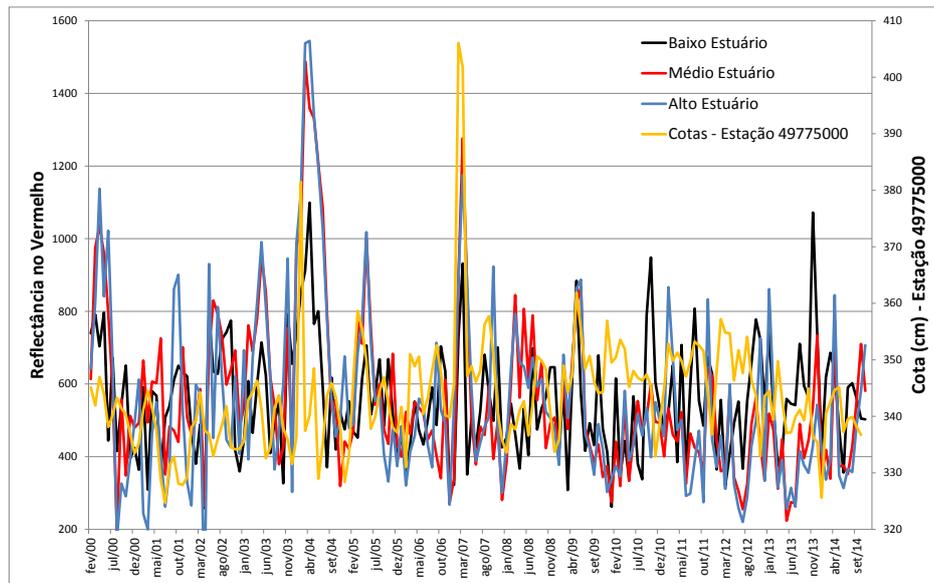


Figura 2. Dinâmica espaço-temporal de reflectância no estuário do RSF.

A Tabela 1 mostra claramente que nos anos anteriores a 2010, havia uma maior contribuição de sedimentos em suspensão provenientes do RSF. Estudos mostram que o RSF e a sua zona costeira vêm sofrendo drásticas alterações de padrões naturais de vazão e redução na concentração e carga de sedimentos devido à grande quantidade de barragens construídas no setor médio-baixo da bacia entre as décadas de 70 e 90 (Medeiros *et al.*, 2007e 2014; Oliveira 2009). O transporte de material pelo rio sofreu redução da carga de nutrientes e material em suspensão: a concentração média do material em suspensão era da ordem de 70 mg/l em 1970, baixando para aproximadamente 5 mg/l nos anos de 2001 e 2002 (Oliveira, 2009).

Tabela 1. Dados médios anuais de reflectância no vermelho nas três áreas do estudo.

Área / Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Baixo Estuário	597	527	555	557	680	551	495	555	527	524	514	570	525	615	541
Médio Estuário	641	545	606	641	926	608	461	578	603	526	457	467	399	427	474
Alto Estuário	618	477	512	640	976	573	464	632	596	533	451	497	401	424	468

Analisando a dinâmica temporal da reflectância nas áreas estudadas (Figura 3), observa-se que o Alto e Médio Estuário apresentam comportamento semelhante na variação da reflectância, enquanto que a área no Baixo Estuário, o comportamento é diferente, assinalando inversões nas condições ambientais.

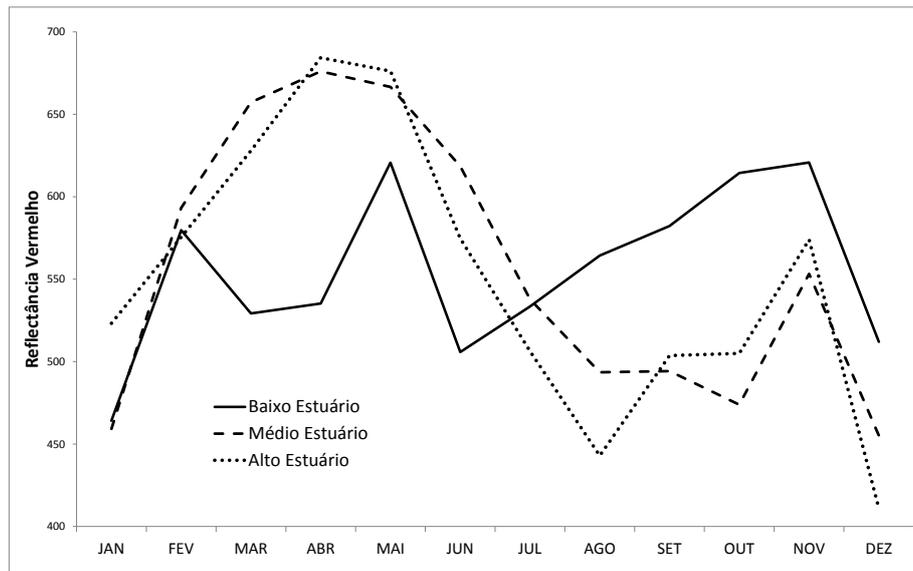


Figura 3. Dinâmica espaço-temporal da reflectância na banda do vermelho na Foz do RSF.

No período de fevereiro a julho, a resposta espectral é maior no Alto e Médio Estuário, enquanto que no período de agosto a dezembro, a resposta foi mais significativa é no Baixo Estuário. Provavelmente, o primeiro semestre apresenta este comportamento em decorrência da estação chuvosa na região, que gera um acréscimo do volume do rio e da concentração de sedimentos nas águas. A partir de agosto é estabelecida uma nova configuração para a distribuição de sedimentos em suspensão na região costeira e estuarina, com uma maior contribuição de sedimentos é no Baixo Estuário. É provável que esta tendência esteja relacionada à diminuição da precipitação, do volume e vazão do rio, favorecendo uma maior influência da maré devido e resuspensão de sedimentos na região estuarina e com entrada de material marinhos. Este fato também foi constatado por Medeiros (2014) que observou que quanto menor a vazão do RSF, maior a intrusão salina.

4. CONCLUSÕES

As áreas estudadas possuem o mesmo padrão de reflectância fortemente influenciado pelo ciclo hidrológico da região. Os resultados demonstraram que a variabilidade espaço-temporal acompanha eventos de estiagem e cheias ao longo do estuário, fato que justifica a manifestação dos menores valores de reflectância (quantidade de sedimento em suspensão) associados aos menores volumes de água no estuário. Acompanhando a reflectância ao longo dos últimos 14 anos no estuário do RSF, foi possível perceber uma redução na descarga e no aporte de material em suspensão e maior influência marinha no estuário, o que deve estar relacionado à construção das diversas barragens ao longo da bacia. A assinatura espectral dos sedimentos em suspensão na água, na banda do vermelho, funciona como parâmetro para identificação do material em suspensão em corpos d'água por meio de imagens de satélite. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a potencialidade do uso desta tecnologia para determinação da concentração de sedimentos. Pode-se afirmar que a proposta metodológica desenvolvida pela ANA/IRD possibilita, após uma calibração com dados de campo, a operacionalização do monitoramento sedimentométrico de ecossistemas aquáticos costeiros e continentais.



5. REFERÊNCIAS

- GOMES, M.V.T.; COSTA, A.S.; GARCIA, C.A.B.; PASSOS, E.A.; ALVES, J.P.H (2010). Concentrações e associações geoquímicas de Pb e Zn Em sedimentos do RSF impactados por rejeitos da produção industrial de zinco. *Química nova*, VOL. 33, NO. 10, 2088-2092, 201.
- MARTINEZ, J.M.; GUYOT, J.L.; FILIZOLA, N.; SONTAG, F. (2009). Increase in suspended sediment yield of the Amazon river assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*, 79, pp. 257-264.
- MEDEIROS, P.R.P.; KNOPPERS, B. A; DOS SANTOS JÚNIOR, R. C.; SOUZA, W.F.L. (2007). Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio São Francisco (SE/AL). *Geochimica Brasiliensis*, 21(2)212 - 231, 2007.
- MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B.; SOUZA, W. F. L.; OLIVEIRA, E. N. (2011): Aporte de material em suspensão no baixo rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 2011, 15(1): 42-53.
- MEDEIROS, P.R.P; SANTOS, M.M; CAVALCANTE, GH; SOUZA, W.F.L; SILVA, W.F (2014): Características ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continente-oceano. *Geochimica Brasiliensis* 28(1): 65-78, 2014 6. DOI: 10.5327/Z0102-9800201400010007
- 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 N° 14. UnB. 114p.
- MORAES, B. C. (2013). Avaliação do uso de imagens do Sensor MODIS no estudo da Pluma de sedimentos do Rio Amazonas. Dissertação de Mestrado – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013. XIV, 84p.
- PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F; SILVA, D.D & RAMOS, M.M. (2007). Estudo do comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.11, n.6, p.615–622, 2007 Campina Grande, PB, UAEAg/UFCG.
- PISCOYA, R.C.C.C.; MARTINEZ, J.M.; NOGUEIRA, M.G., LOPES, W.T. A; COCHONNEAU, G.; VENTURA, D.; VIEIRA, M.R.; OLIVIERA, E; GUIMARÃES, V.S. (2013a). Avaliação do impacto dos reservatórios em cascata sobre o fluxo de sedimentos no rio Paranapanema. In *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, Abr. 2013, pp. 5896-5903.
- PISCOYA, R.C.C.C.; MARTINEZ, J.M.; LOPES, W.T. A; COCHONNEAU, G.; NOGUEIRA, M.G., VENTURA, D.; VIEIRA, M.R.; OLIVIERA, E. (2013b). 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.

VENTURA, D.L.T. (2013). Uso do Sensoriamento Remoto para Monitoramento da Concentração de Clorofila A em Açudes do Semiárido. Dissertação de Mestrado. UnB. 59p.

VILLAR, R.E. (2013). Monitoramento das Dinâmicas Espaciais e Temporais dos Fluxos Sedimentares na Bacia Amazônica a partir de Imagens de Satélite. UnB. Tese de Doutorado Nº 8. 226p.

OLIVEIRA, E. N. (2009). Impacto de barragens sobre a dispersão de matéria e a sustentabilidade da pluma costeira do RSF (AL/SE): análise espacial e temporal por sensoriamento remoto. Dissertação de mestrado. UFF/ Niterói, RJ : [s.n.], 2009. 158 p.

AGRADECIMENTOS

Gratidão a Henrique Bernini, do Laboratório de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pelo auxílio técnico na confecção do mapa.