

Estudo da variabilidade temporal da pluma de turbidez do Rio Doce na costa do Espírito Santo a partir de imagens Landsat e MODIS-Aqua

Natalia Rudorff¹
Conrado de Moraes Rudorff²
Gustavo Ortiz¹
Milton Kampel¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
natalia.rudorff@cptec.inpe.br, {gustavo.ortiz, milton.kampel}@inpe.br

²Centro Nacional de Monitoramento de Alertas e Desastres Naturais - CEMADEN
Estrada Dr. Altino Bondesan, 500, Eugênio de Melo, São José dos Campos - SP, Brasil
conrado.rudorff@cemaden.gov.br

Abstract. The present work shows the temporal evolution of the Doce River discharge and turbidity plume at the Espírito Santo coast, southeast Brazil, using *in situ* data and Landsat images from 1985 to 2016. MODIS-Aqua imagery was used to analyze changes in the dispersion of the plume under influence of synoptic atmospheric systems. Turbidity maps were obtained using a globally parameterized model, which had a reasonable comparison with *in situ* data obtained at the river mouth. The Doce River watershed has been suffering from various environmental e.g., precipitation variability, and anthropogenic stressors e.g., land-use changes, impacting the quality and volume of the river over the years, with an overall negative discharge tendency, and a high interannual variability, with frequent flooding events, causing higher turbidity. In 2015 the river faced its worst disaster with the collapse of a mining waste water dam, which increased turbidity, despite the low discharge caused by a drought season. The denser turbid plume traveled up to ~13 km towards the southern shelf, and the diluted plume more than 75 km, as during high flooding events. Changes on the dominant wind pattern from NE to S, can change the dominant flow of the plume from S to E-NE, and increase turbidity over the northern shelf, with contribution of other rivers and bottom resuspension. The Doce River plume should be monitored with satellite imagery and *in situ* campaigns as flooding events are likely to occur and may still wash out mud accumulated in the main river.

Palavras-chave: Doce River Plume, coastal water remote sensing, turbidity, Landsat, MODIS, time-series, Pluma do Rio Doce, sensoriamento remoto de águas costeiras, turbidez, Landsat, MODIS, séries temporais.

1. Introdução

O Rio Doce é o maior manancial de água doce do Espírito Santo (ES) e é o principal rio que deságua na sua costa (ANA, 2016). O rio possui um papel vital nos ecossistemas marinhos transportando nutrientes e sedimentos para a planície costeira. Os sedimentos são importantes para alimentar os cordões arenosos da faixa litorânea, que é constantemente erodida pela ação das ondas. Os nutrientes são importantes para a produtividade primária marinha, que mantém os estoques pesqueiros e biodiversidade. O excesso de nutrientes e sedimentos, no entanto, pode ocasionar sérios danos ambientais, como a eutrofização, intoxicação, assoreamento e o colapso de ecossistemas (Carter, 1995).

Há décadas que a bacia hidrográfica do Rio Doce vem sofrendo impactos de ordem natural i.e., com anos de precipitação intensa e alagamentos, e antropogênica, i.e., com desmatamento, construção de barragens, entre outros. Em Novembro de 2015 o Rio Doce enfrentou o pior desastre ambiental da história recente do Brasil. Um reservatório de rejeitos de mineração se rompeu num distrito de Mariana (Bento Rodrigues, MG), liberando ~50 milhões m³ de lama contaminada, causando danos ambientais e sócio econômicos sem precedentes na região. Após percorrer 650 km em 16 dias, a onda de lama chegou à foz do rio, comprometendo o consumo de água doce, atividades de pesca, banho e mergulho (turismo), desova de tartarugas marinhas e a saúde dos ecossistemas do entorno (ANA, 2016).

Para avaliar os impactos do desastre na qualidade da água do rio e acompanhar sua recuperação, é preciso primeiro conhecer a condição anterior e monitorar sua evolução. As imagens da série Landsat-TM-5 estão disponíveis desde 1985, permitindo resgatar uma série história de 30 anos, que pode ser utilizada para analisar as condições “anteriores”, e entender quais os principais processos ambientais e antrópicos que interferem na qualidade da água do rio. O sucessor Landsat-8, lançado em 2013, permite continuar a série com uma resolução radiométrica e espectral ainda melhor, especialmente importante para o monitoramento de sistemas aquáticos (Vanhellemont, Ruddick, 2015). A resolução espacial de 30 m também é importante para mapear sistemas aquáticos costeiros com alta heterogeneidade espacial. O sensor MODIS-Aqua tem uma resolução mais grosseira (250 m - 1 km), mas, em contrapartida, a alta resolução temporal permite o monitoramento diário, e análise de eventos específicos de forma complementar à série Landsat.

A estimativa de parâmetros de qualidade da água por sensoriamento remoto em águas costeiras é um grande desafio devido às dificuldades na correção atmosférica e complexidade óptica dos constituintes da água (IOCCG, 2000). Um modelo relativamente simples e robusto que tem demonstrado resultados consistentes em diferentes regiões costeiras e estuarinas é o modelo de turbidez proposto por Dogliotti et al. (2015). A turbidez está relacionada às partículas em suspensão na água e é um dos principais parâmetros de qualidade da água monitorado no Rio Doce por órgãos de gestão ambiental (e.g. ANA, CPRM, IEMA).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a evolução temporal da pluma de turbidez do Rio Doce, na costa do ES, ao longo de 30 anos, com imagens da série Landsat-TM-5 (1985-2011) e Landsat-8 (2013-2016), a fim analisar a variabilidade da pluma antes e após o desastre de Mariana. Dados auxiliares de vazão e turbidez *in situ*, foram utilizados para complementar as análises. Imagens MODIS-Aqua e campos de vento do sensor ASCAT-MetOP-A/B foram utilizados em eventos específicos, para o acompanhamento da dispersão da pluma após o desastre.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

A Bacia hidrográfica do Rio Doce possui 83,4 mil km², com as nascentes nas serras da Mantiqueira e Espinhaço (MG) (1200m), próximo à região onde ocorreu o desastre do rompimento da barragem. A foz está localizada na costa centro-norte do ES, plataforma sudeste do Brasil (Figura 1).

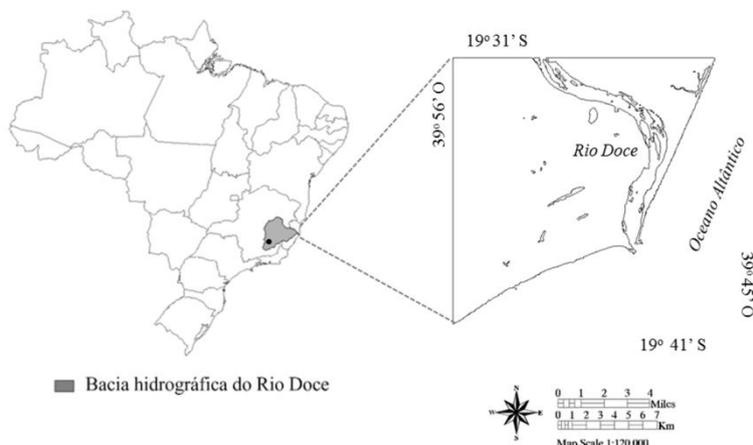


Figura 1. Mapa da área de estudo com a indicação da bacia hidrográfica do Rio Doce, o local aproximado do desastre de Mariana (MG), e a foz na costa do Espírito Santo.

2.2 Aquisição e Processamento das Imagens de satélite

As imagens Landsat-TM-5 (USGS/NASA) foram adquiridas do repositório mantido pelo INPE/DGI (www.inpe.br) e as imagens Landsat-8 da USGS (www.earthexplorer.usgs.gov). A correção atmosférica das imagens TM-5 foi realizada com o modelo de transferência radiativa *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)* (Vermote *et al.*, 1997). As imagens OLI foram corrigidas com o modelo Acolite (Vanhellemont & Ruddick, 2015), utilizando as bandas do SWIR para a estimativa de aerossóis. Este modelo foi especialmente desenvolvido para aplicações deste sensor em águas costeiras. As imagens MODIS-Aqua foram adquiridas do grupo OBPB da NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) e processadas no SeaDASv7.

Para análise da série temporal mais longa, foram selecionadas 16 imagens Landsat TM-5 no período de 1985-2011, sendo cada imagem representativa do período chuvoso de cada ano, com maior expressão da pluma, e livre de nuvens (Abril-Maio). As imagens Landsat-8 foram adquiridas com uma maior frequência temporal, ao longo de todo o ano, de Novembro de 2013 a Julho de 2016 (N=27), para ter uma representatividade maior da variabilidade da pluma do rio no período mais recente antes e após o desastre de Mariana.

O modelo de turbidez de Dogliotti *et al.* (2015), aplicado às imagens, é um modelo semi-analítico parametrizado com dados de turbidez coletados em diferentes regiões costeiras e estuarinas, incluindo a Guiana Francesa, com influência da pluma do Rio Amazonas, e o Rio da Prata (Argentina), com valores de < 1 a > 1000 FNU. O modelo utiliza a reflectância de superfície em 645 nm para estimar os valores de turbidez de 0 a 20 FNU e a reflectância em 859 nm para estimar de 20 a > 1000 FNU. Como a turbidez é uma medida feita pelo espalhamento das partículas, este parâmetro possui uma relação direta e praticamente universal com a reflectância da água, independentemente do tipo e tamanho das partículas. Este é, portanto, o único modelo “global” que pode ser aplicado a águas costeiras, já que outros modelos de concentração de sedimentos em suspensão, matéria orgânica e clorofila-*a*, precisam de parametrizações regionais e sazonais, devido à variabilidade das propriedades ópticas específicas destes constituintes (IOCCG, 2000). Não obstante, para verificar a confiabilidade deste parâmetro no presente estudo, foram feitas comparações da turbidez extraída das imagens (numa janela de 3 x 3 pixels) com coletas *in situ* realizadas na praia de Regência, próximo à foz, pelo IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente, ES), após o desastre. Para ampliar o número de comparações foi utilizada uma janela temporal de ± 1 dia entre a coleta e aquisição das imagens.

Para análise da variabilidade temporal da turbidez da pluma do Rio Doce foram extraídos os valores de turbidez numa janela de 3 x 3 pixels logo na desembocadura do rio, em cada imagem. As imagens RGB e mapas de turbidez também foram utilizados para extrair informações da extensão da pluma de sedimentos do rio e direção de propagação. Os dados auxiliares de vazão na estação Colatina (a 122 km da foz) foram obtidos da ANA, de 1985 a 2016. O campo de vento do sensor ASCAT a bordo do satélite MeTOP-A (ESA/EUMETSAT) foi obtido do *Royal Netherlands Meteorological Institute* (KNMI, <http://projects.knmi.nl/scatterometer>).

3. Resultados e Discussão

A vazão média mensal do Rio Doce, na estação Colatina, de 1985 a 2016, apresenta uma oscilação sazonal com maior vazão nos meses chuvosos de verão, sendo a média máxima em Janeiro (1752 ± 884 m³/s) e menores no inverno, com mínima em Agosto (322 ± 108 m³/s). Há também uma variação interanual demarcada por anos consecutivos de anomalias positivas de vazão, i.e, 1985-1986; 1992-1994, 1996-1997, 2002-2006, 2009, 2013 (Figura 2), com ocorrência de cheias extremas (CPRM, 2014). Nestes anos houve uma maior persistência e intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a região, que é o

principal sistema que regula a precipitação sazonal no sudeste do Brasil (CPTEC, 2016). Já os anos de 2010-2011 e 2015-2016 foram marcados por períodos de estiagem com anomalias de vazão abaixo de 2,0. Os anos de estiagem no final da série favoreceram uma tendência negativa de vazão no período analisado (Figura 2b). Porém, analisando uma série maior de vazão, de 1938 a 2005, Coelho (2006) também detectou uma tendência de diminuição da vazão do Rio Doce, principalmente decorrente da regulação do uso da água com a instalação de reservatórios hidroelétricos, e por processos de desmatamento, mudanças de uso do solo (monocultura e pastagens), e alterações na morfologia do canal. Um dos impactos da diminuição da vazão apontado por Coelho (2006) é, por exemplo, o assoreamento do leito do rio e a formação de cordões arenosos na foz do Rio Doce. Todavia, mesmo com esta possível tendência de diminuição da vazão do Rio Doce, os anos de cheias extraordinárias são frequentes, e causam sérios impactos sócio-ambientais (CPRM, 2014).

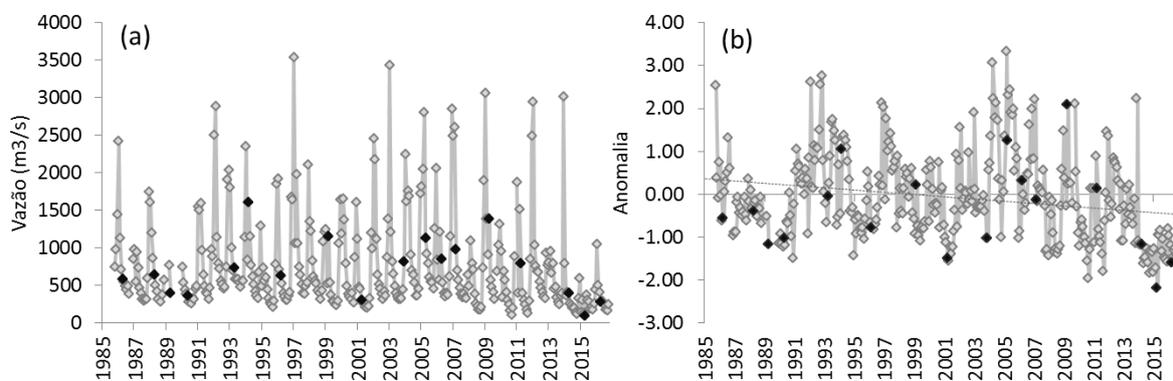


Figura 2. Médias mensais (a) e anomalias (b) da vazão do Rio Doce na Estação Colatina (ES), a 122 km da foz. Os pontos destacados em preto correspondem às datas com imagens Landsat.

As imagens Landsat adquiridas para análise da série longa, mesmo não representando o mês de vazão máxima, devido à alta cobertura de nuvens, representaram razoavelmente bem o padrão de oscilação da série, com imagens representativas de anos de cheia e estiagem (Figura 2). Os dados de turbidez coletados *in situ* apresentaram uma concordância razoável com os dados extraídos das imagens OLI com R^2 de 0.57 e coeficiente de variação de 45% (no intervalo de 20 a 4500 FNU) (Figura 3a). Este é um bom desempenho considerando a diferença nas janelas temporais (± 1 dia) e espaciais de coleta (desembocadura/praias e mistura subpixel).

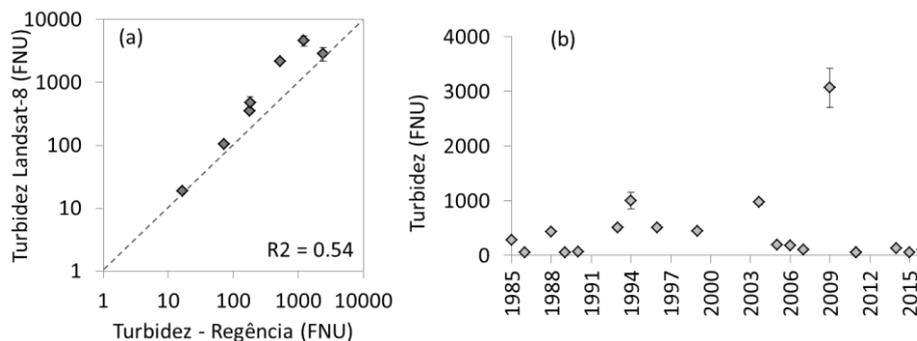


Figura 3. (a) Comparação dos valores de turbidez medidos *in situ* na praia de Regência (IEMA) com os valores extraídos da imagem Landsat-8 (11/2015-07/2016); (b) Evolução temporal da turbidez da foz do Rio Doce extraída das imagens Landsat-TM 5 e Landsat 8 OLI (1985-2016) nos meses de período chuvoso, livre de nuvens (Abril-Maio).

A série temporal de turbidez nos meses de Abril-Maio, na desembocadura do Rio Doce, mostra valores que variam de 54 ± 7 FNU em 1990 e 51 ± 04 FNU em 2015 (anos de estiagem) a 3063 ± 362 FNU em 2009 (cheia extraordinária) (Figura 3b). Em 1994 e 2004 também houveram picos positivos de turbidez, acima de 1000 FNU, relacionados a eventos de cheia do Rio Doce (CPRM, 2014). Nestes eventos a turbidez aumenta devido ao carreamento de sedimentos pelo rio, que é agravado pelo desmatamento da mata ciliar e impermeabilização do solo nas áreas urbanas, ampliando a área alagada da várzea. Como há diversos trechos do Rio Doce, sem mata ciliar e com solo empobrecido por práticas de pastagens, a erosão das margens e assoreamento das áreas planas têm ocorrido de forma mais acelerada nos últimos 30 anos (ANA, 2016).

Após o rompimento da barragem de Mariana em Novembro de 2015, a turbidez do Rio Doce na foz chegou a 2869 ± 690 FNU em 30/11/2015, data da primeira imagem Landsat adquirida depois da lama chegar à foz (em 21/11/2015). Com o aumento da precipitação, principalmente na cabeceira da bacia hidrográfica, a turbidez aumentou atingindo o máximo de 4645 ± 890 FNU em meados de Dezembro. No final de Dezembro - início de Janeiro a turbidez voltou a reduzir para 347 FNU (01/01/2016), mas no final de Janeiro - início de Fevereiro chuvas intensas e prolongadas em quase toda a bacia (340 mm/mês acumulados em Janeiro/2016 na Estação Ponte Nova, ANA (2016)), fizeram com que a turbidez do Rio Doce voltasse a aumentar, com 2160 ± 125 FNU em 02/02/2016. A partir de Abril de 2016 a turbidez foi reduzindo a níveis mais baixos, com valores de 19 ± 1 e 15 ± 3 FNU em Julho e Setembro, respectivamente, acompanhando o pulso natural da vazão no período de seca ($232 \text{ m}^3/\text{s}$ em Julho e $166 \text{ m}^3/\text{s}$ em Setembro) (Figuras 4 e 5).

Os valores de turbidez extraídos das imagens Landsat na foz do Rio Doce, após o desastre, não chegaram a atingir o valor da cheia extraordinária de Dezembro de 2013, com 7432 ± 2162 FNU, mas chegou próximo mesmo com uma vazão média mensal bem inferior com $448 \text{ m}^3/\text{s}$ em 12/2015 e $3013 \text{ m}^3/\text{s}$ em 12/2013 (Figura 4). De Novembro de 2015 a Outubro de 2016 a vazão média mensal foi até mesmo abaixo da média histórica (Figura 2), o que deve ter facilitado o menor transporte de sedimentos até a foz, e deposição ao longo do leito do rio. Se nos próximos verões a precipitação voltar a aumentar, pode-se esperar que haja um aumento mais expressivo da turbidez, devido à erosão das margens do rio, destruição da mata ciliar, e acúmulo de rejeitos ao longo das margens e leito de todo o rio, ocasionada pela passagem da onda de rejeitos com o rompimento da barragem de Mariana (ANA, 2016).

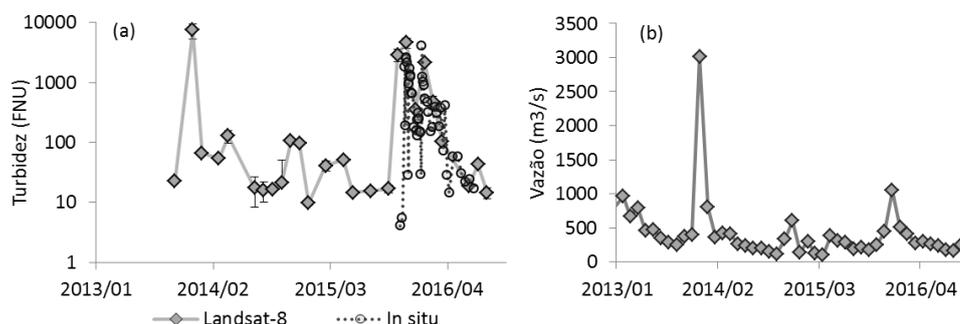


Figura 4: (a) Evolução temporal da turbidez na foz do Rio Doce (*in situ* e Landsat-8); e (b) vazão média mensal do Rio Doce na estação Colatina (b) de 01/2013 a 09/2016.

Os ventos dominantes que atuam ao longo de todo o ano na plataforma do Espírito Santo são de NE. Estes ventos promovem o transporte horizontal das águas costeiras na direção S-SE-SO, sendo esta a direção predominante de dispersão da pluma do rio Doce (Figuras 5 e 6). A distância máxima que a pluma de turbidez atingiu na série anterior ao desastre de Mariana, foi em Dezembro de 2013, com 13 km distância para a pluma mais densa (< 20 FNU), na

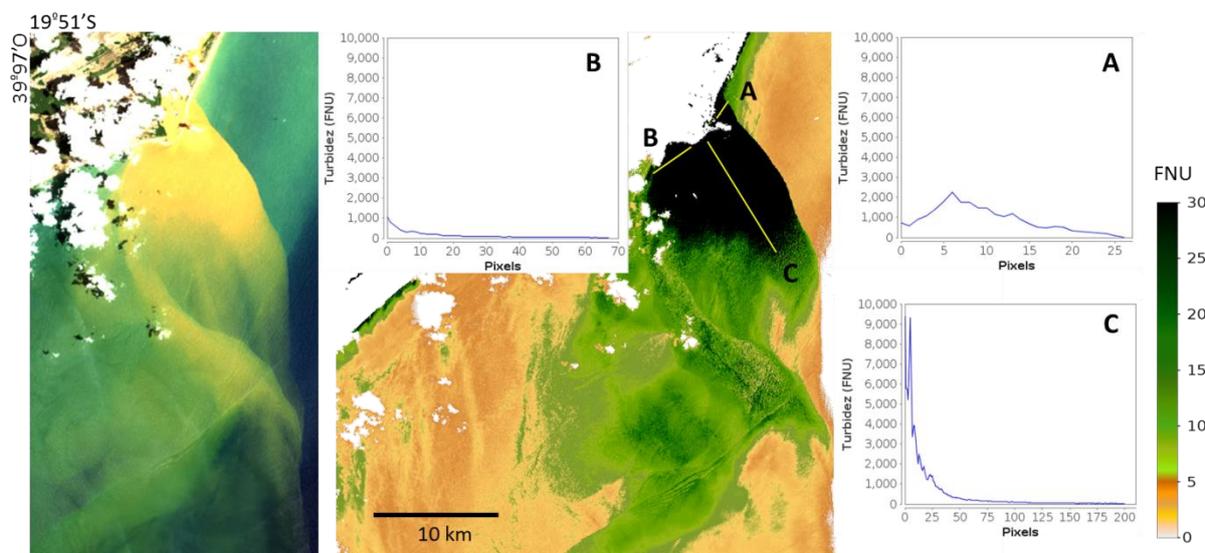


Figura 6: Transectos horizontais da pluma de turbidez do Rio Doce na imagem Landsat-8 de 16/12/2016 (cada pixel = 30 m²).

Alterações persistentes na direção do vento, geradas pela atuação de sistemas atmosféricos frontais, podem, no entanto, inverter o sentido das correntes costeiras direcionando a dispersão da pluma do rio Doce, e de toda a água costeira, para a plataforma norte do ES. Um evento que alarmou órgãos de gestão ambiental, após o desastre de Mariana, com um aumento anômalo da turbidez na plataforma norte do ES e sul da Bahia, ocorreu no início de Janeiro de 2016. Nestes dias uma frente subtropical adjacente ao ES gerou ventos intensos de sul (6-10 m/s), advectando toda a água costeira ao norte e aumentando a turbidez na plataforma (Figura 7). Além dos ventos intensos, a arrebentação de ondas de ressaca (> 2m), associadas ao evento meteorológico, favoreceram ainda mais a resuspensão de sedimentos nas áreas mais rasas da plataforma continental, que no caso do norte do ES e sul da Bahia é extensa, o que facilita o aumento da turbidez (Segal et al., 2008). A pluma mais densa de turbidez do Rio Doce (> 20 FNU), no entanto, permaneceu próximo à foz (<5 km, na direção SE), e a pluma menos densa se misturou à água costeira não sendo possível identificar uma frente de separação na imagem.

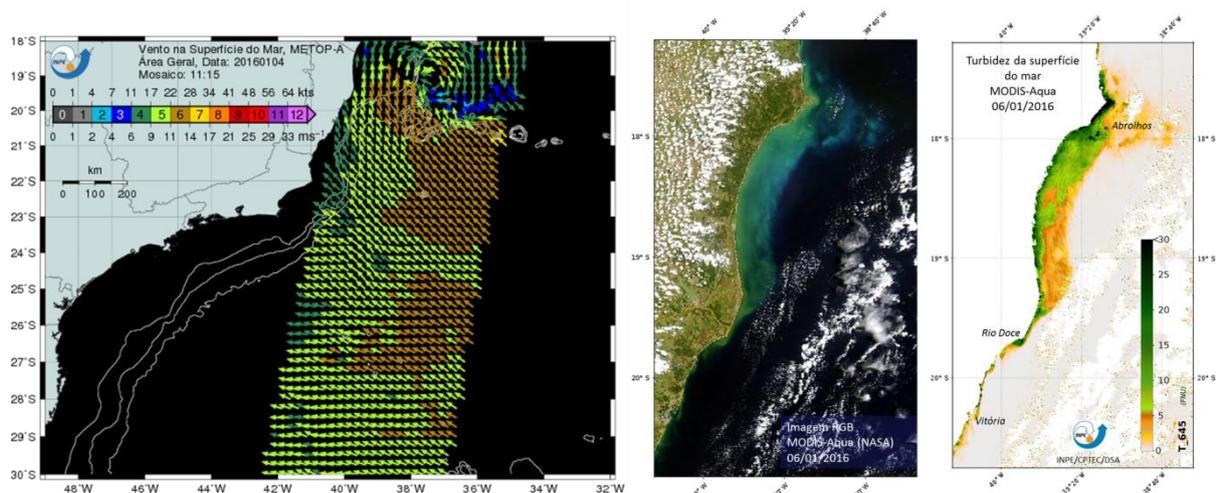


Figura 7: Campo de vento superficial do mar do sensor ASCAT-MetOP/A, imagem RGB (543) e mapa de turbidez MODIS-Aqua de 05/01/2016, da plataforma do ES e sul da Bahia.

4. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma análise da variabilidade da pluma de turbidez do Rio Doce a partir de imagens Landsat, MODIS-Aqua, e dados auxiliares *in situ*. O modelo de estimativa de turbidez por satélite foi adequado para mapear a qualidade e extensão da pluma do rio. A vazão do Rio Doce apresenta uma tendência de diminuição ao longo do tempo, que pode estar relacionada a processos de regulagem do uso da água, agravada pela estiagem sofrida nos últimos anos (2014-2015). Não obstante, a bacia hidrográfica também sofre com uma alta variabilidade interanual com eventos frequentes de cheias extremas que carrega sedimentos para a foz, indicada pelos altos valores de turbidez observados nestes eventos. Após o desastre ambiental do rompimento da barragem de rejeitos de mineração em Mariana (MG), a turbidez na foz aumentou significativamente, apesar da vazão ter permanecido abaixo da média histórica para os meses subsequentes. Os valores de turbidez não atingiram os obtidos na cheia de 2013, mas se nos próximos verões a precipitação aumentar e houver eventos de cheias extremas, a turbidez pode ficar elevada, devido à degradação das margens do rio e deposição de sedimentos no leito, agravadas pelo desastre. Na costa adjacente, a pluma de turbidez mais densa do rio se concentra na porção S-SO-SE até ~10 km da foz, com ventos dominantes de NE. Porém, a atuação de sistemas frontais com ventos persistentes do quadrante S pode alterar a dispersão da pluma para L-NE e aumentar a turbidez na plataforma norte do ES, com a mistura de outras fontes de rios e resuspensão do fundo. Imagens Landsat com média-alta resolução espacial e MODIS-Aqua com alta resolução temporal são ferramentas poderosas de análise da pluma superficial do Rio Doce e devem ser utilizadas em conjunto com estações e campanhas *in situ*, para o monitoramento ambiental.

Referencias Bibliográficas

- ANA, Agência Nacional de Águas, **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce, Rompimento da Barragem em Mariana (MG), Informe 2015**. Brasília, 2016
- Carter, R. W. G. **Coastal Environments - An introduction to physical, ecological and Cultural systems of coastlines**. London: Academic Press, 617p. 1995
- CPTEC, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Disponível em: <http://infoclima1.cptec.inpe.br/>, Acesso em: 10/10/2016.
- Coelho, A. L. N., Situação hídrico-geomorfológica da Bacia do Rio Doce com base nos dados da série histórica de vazões da estação de Colatina – ES, **Caminhos de Geografia**, Uberlândia v 6, n. 19, p. 56-79, 2006.
- CPRM, 2014, **Relatório Técnico do Período Crítico de Dezembro de 2013, Sistema de Alerta de Enchentes da Bacia do Rio Doce**, Belo Horizonte, MG, 99p.
- Dogliotti, A., Ruddick, K. G., Nechad, B., Doxaran, D., Knaeps, E., A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, 156, 157-168, 2015.
- IOCCG, **Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal and Other Optically-Complex Waters**. 3. ed. Dartmouth, Canada: Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, 140 p., 2000.
- Marinha do Brasil, **Levantamento Ambiental expedito em Regência/ES**, LH-035/12, Diretoria de Hidrografia e Navegação, Vitória (ES), 2016.
- Segal, B. et. al., Potential impacts of polar fronts on sedimentation processes at Abrolhos coral reef (South-West Atlantic Ocean/Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 4-5, p. 533-544, 2008.
- Vanhellemont, Q., Ruddick, K., Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: examples from Landsat-8. **Remote Sensing of Environment**, 161, 89-106. 2015.
- Vermote, E.F., et al., Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 35 (3), 675-686, 1997.