SENSORIAMENTO REMOTO NA DETERMINAÇÃO DA TURBIDEZ EM RESERVATÓRIOS

Helio Lopes[1]; Maria do Carmo Sobral[1]; Günter Gunkel[2]; Gustavo Melo[1] & Ana Candeias[1]

RESUMO - Esse trabalho tem como objetivo determinar e avaliar o comportamento da turbidez no reservatório de Itaparica, localizado no sub-médio São Francisco. Para esse fim, utilizou-se de imagem Landsat-TM, na qual foram utilizadas as bandas 2 e 3 para o cálculo da radiância e reflectância da superfície do corpo hídrico. Essas equações e o modelo aplicado foi escrito em linguagem LEGAL-SPRING 5.2. A partir da imagem da turbidez realizou-se o fatiamento do corpo hídrico em oito classes. O valor mínimo foi de 27,98 NTU e o maior foi de 54,26 NTU. A classe que apresentou maior área foi de 30 a 32 NTU com 45,66%, seguida da classe 32 a 34 NTU com 43,72% da área total do reservatório, conforme observado por histograma. Por meio da análise gráfica de 24 pontos situados ao longo do reservatório verifica-se que a os valores de turbidez não variam muito e apenas o ponto 20 apresentou valor mais elevado. Em futuros estudos há necessidade de se validar os valores encontrados com dados de campo de forma a verificar a precisão do mapeamento para o reservatório em estudo, observando dia e horário da passagem do sensor, bem como as estações de seca e chuvosa.

ABSTRACT - This work aims to determine and evaluate the turbidity behavior in the Itaparica reservoir, located in the sub middle São Francisco. With this, it was used Landsat-TM imagery, in which were used bands 2 and 3 to calculate radiances and reflectance of the water body. These equations and turbidity model applied were written in LEGAL language available in SPRING-5.2. From the turbidity imagery, the slicing of the reservoir into eight classes was carried out. The minimum value was 27.98 NTU and the highest was 54.26 NTU. The class that had the greatest area was 30 - 32 NTU with 45.66%, followed by class 32 - 34 NTU with 43.72% of the total area of the reservoir, as shown in the histogram. Through the graphical analysis of 24 points located throughout the reservoir it was verified that the turbidity values do not vary greatly and only the point 20 had a higher value. In further research there is a need to validate the data found in this study with field campaign in order to verify the accuracy of the turbidity mapping. It must be also observed the day and overpass time of the satellite as well as rainy and drought seasons.

Palavras-chave: Qualidade da água, Sensoriamento remoto, Reservatório de Itaparica

INTRODUÇÃO

Atualmente pesquisadores vem utilizando dados espectrais para a determinação de parâmetros de qualidade de água (ex. Kutser, 2012; Saldías et al., 2012; Alcântara et al., 2009). A determinação da turbidez é uma etapa comum na avaliação da qualidade da água (Hadjimitsis et al., 2006). Em regiões com diversos corpos d'água e de grandes dimensões como reservatórios, a amostragem de campo para monitoramento e avaliação da qualidade da água torna-se dispendioso em termos de tempo e custos, logo o sensoriamento remoto torna-se viável por ser uma ferramenta potencial para acessar parâmetros de qualidade da água em grandes áreas (Hadjimitsis et al., 2006).Um dos

1) Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Departamento de Eng Civil, R. Acadêmico Helio Ramos S/N, Recife-PE, heliovasf@hotmail.com,msobral@ufpe.br,gustmelo@gmail.com,analucia@ufpe.br
2) Universidade Técnica de Berlim, Faculdade de Engenharia Ambiental, Strasse 17 Juni, 135, Belim, guenter.gunkel@tu-berlin.de

parâmetros modelados por dados espectrais é a turbidez (Saldías et al., 2012; Bustamante et al., 2009; Hadjimitsis et al., 2006; Moreno-Madrinan et al., 2010). Imagens de satélite de sensores multiespectrais tem sido usadas para mapear áreas inundadas, como também para determinar características do corpo hídrico como a turbidez, profundidade da água, biomassa fitoplâncta, distribuição de vegetação aquática (Bustamente et al., 2009).

A banda espectral do Landsat que possui maior correlação com a turbidez é a B3 (630 - 690 nm) indicando uma correlação linear positiva (Bustamente et al., 2009) e sua utilização permite, com precisão suficiente, a reconstrução histórica da turbidez (Díaz-Delgado et al., 2006; Bustamente et al., 2009). Dessa forma a reconstrução de regimes de turbidez a partir da disponibilidade de serie de dados Landsat é uma técnica que permitirá entender as os processos de assoreamento e sedimentação (Bustamente eta al., 2009). Os sedimentos suspensos é o maior indicador visível de problemas associados a erosão do solo em razão de impactar a qualidade da água e atividades biológicas em reservatórios (Choubey e Subramanian, 1992).

A turbidez é um índice comumente usado para determinar a penetração da luz na coluna d'água. A sua determinação com precisão é fundamental no estabelecimento de plano de manejo e restauração ambiental, na predição de determinados poluentes e para a estimativa de fluxos de sedimentação em corpos hídricos (Moreno-Madrinan et al., 2010). A matéria suspensa é naturalmente originada da erosão, porem atividades humanas como o desmatamento e uso do solo aumenta a entrada de sedimentos (particulas suspensas) nos corpos hídricos (rios, reservatórios, estuários). Logo, quanto mais materia suspensa na água, maior a sua turbidez, reduzindo a penetração da luz na água.

Moreno-Madrinan et al. (2010) afirmam que há produtos derivados de satélite, entre os quais incluem o Espectrorradiomentro de Imagens de Resolução Moderada - MODIS/Terra, dispondo do produto de reflectância diária (MOD09GQ) referente a banda 1 (620 - 670 nm) que está disponível em resolução espacial de 250 m e corrigida para efeitos atmosféricos, sendo esta banda útil para a estimativa de turbidez.

A determinação de algoritmos empíricos deve ser considerado para cada região geográfica. Assim, precauções devem ser tomadas na aplicação desses modelos empíricos em diferentes condições geográficas e limnológicas, devido à forte dependência da turbidez e reflectância em relação a composição física, biológica e mineral das partículas e materiais dissolvidos (Woodruff et al., 1999; Whitlock et al., 1981).

Nellis et al. (1998) aplicaram modelos físicos existentes que usam a reflectância da banda TM3 para estimar variação em sedimentos suspensos, turbidez, e profundidade Secchi no

reservatório Tuttle Creek, Kansas, EUA. Os mapas temporais gerados relativos aos parâmetros de qualidade de água foram comparados e analisados de modo a acessar mudanças espaciais e temporais. Por meio da comparação temporal, verificou-se que o maior nivel de sedimentos suspensos ocorrem entre abri e julho, e a diminuição da área e da concentração ocorre em meados de setembro (Nellis et al., 1998). O estudo de Nellis et al. (1998) ilustra a vantagem do uso do sensoriamento remoto para assistir na documentação em relativo curto prazo de possível risco ambiental, como também mostra a viabilidade de dados do Landsat TM para mapear variações geográficas e de qualidade em ecossistemas aquáticos associando a eventos climáticos (Nellis et al., 1998).

Assim, dados espectrais podem ser aplicados em estudos de qualidade de água, por conseguinte, esse trabalho objetiva aplicar dados de imagem de satélite na avaliação do comportamento da turbidez no reservatório de Itaparica, sertão da Bahia e Pernambuco, nordeste do Brasil.

MATERIAL E MÉTODO

Área de estudo

O reservatório de Itaparica, com área de 828 km^2 e volume total de 10.782 Hm^3, localiza-se entre os estados da Bahia e Pernambuco e foi criado com o fechamento da barragem de Itaparica (Luiz Gonzaga) no final da década de 80 do século passado. As águas banham os municípios de Tacaratu, Petrolândia, Floresta, Itacuruba e Belém do São Francisco do lado de Pernambuco (Figura 1). As coordenadas da barragem são 38° 19' de longitude oeste e 9° 06' de latitude sul, sendo a altitude máxima do nível da água de 305,40 m e o nível mínimo operativo de 299,0 m (CHESF, 2012).

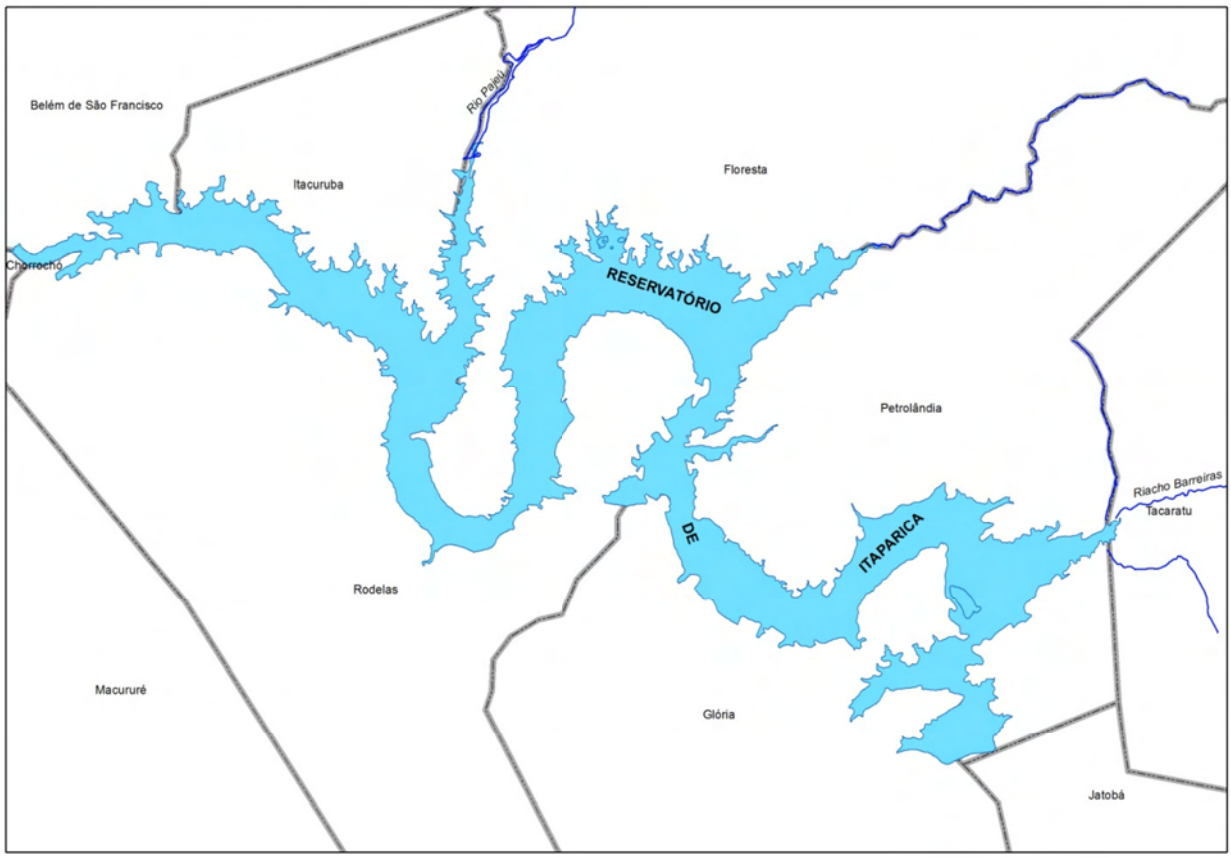

Figura 1. Área de estudo.

Processamento de dados espaciais

A turbidez foi mapeada a partir de imagem do Landsat TM correspondente a órbita/ponto 216/66 de 06 de outubro de 2010 (época seca), a qual foi georreferenciada tomando como referência uma imagem de 2003. Essa imagem foi solicitada e capturada no catálogo do INPE e após esses procedimentos as sete bandas foram empilhadas para fins de georreferenciamento. Foi verificada a ocorrência de poucas nuvens sobre o reservatório, as quais foram mascaradas como valor zero. O georreferenciamento foi executado utilizando o sistema de coordenadas geográficas WGS84 com ajustamento polinomial de primeira ordem. O erro médio quadrático foi da ordem de 0,94 pixel, que corresponde a um erro menor que 30 metros que é a resolução espacial da imagem do Landsat TM referente às bandas do visível e infravermelho próximo e médio. A imagem georreferenciada foi recortada no formato do reservatório melhorando a aplicação do contraste e visualização de diferenças espectrais. Subseqüentemente foi realizada a classificação do uso e cobertura do solo no entorno do reservatório, de forma a se localizar as maiores classes com potencial de produção de sedimentos e analisar com relação ao valor de turbidez encontrado.

Algoritmos de espacialização da turbidez

Nesse trabalho foi avaliado o modelos desenvolvido por Wang et al (2006). Nesse modelo de espacialização da turbidez é utilizado a banda 2 e a banda 3 do sensor Landsat TM. Para isso foram determinadas as radiâncias e reflectâncias para as bandas TM2 e TM3, conforme a equação 1 e 2.

$$L_{rad} = L_{i,min} + \left(\frac{L_{i,max} - L_{i,min}}{255} \right) \times NC_i \quad (1)$$

Em que, L_i é a radiância espectral na banda i em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$; $L_{i,max}$ e $L_{i,min}$ os valores de radiância máxima e mínima na banda i, respectivamente; NC_i o nível de cinza na banda i. As constantes de calibração Lmax e Lmin TM, cujos valores, válidos para imagens geradas após 5 de maio de 2003, de acordo com Chander e Markham (2003).

Após a determinação da radiância para cada banda, calcula-se a reflectância de cada banda ($\rho_{o,i}$) (equação 2), que é obtida pela razão entre a radiação solar refletida e radiação solar incidente em cada pixel. Em outras palavras, $\rho_{o,i}$ representa a porção da radiação solar de cada banda que é refletida por cada pixel da imagem e o seu cômputo é efetivado pela equação (Allen *et al.*, 2002):

$$\rho_{o,i} = \frac{L_{rad} \times \pi}{E_{o,i} \times \cos\theta \times d_r} \quad (2)$$

em que, $\rho_{o,i}$ é a reflectância espectral na banda i; *dr* o inverso do quadrado da distância Terra-Sol em unidade astronômica; $E_{o,i}$ o valor médio da irradiância solar exoatmosférica na banda *i* em $W.m^{-2}\mu m^{-1}$ (constante solar); θ o ângulo zenital solar (calculado a partir da informação do ângulo de elevação solar, β, disponível no arquivo cabeçalho da imagem: $\theta = (90° - \beta)$ e *Li* é a radiância espectral na banda *i* em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$.

A partir da determinação das reflectâncias para cada banda, procedeu-se o cálculo da turbidez. A equação foi inserida em LEGAL do Spring 5.2, conforme formulação abaixo (Wang et al., 2006).

$$TU = 19{,}047 + (144{,}049 \times R2) - (11{,}715 \times R3)$$

em que R2 e R3 são as reflectâncias na banda 2 e 3 do Landsat, respectivamente.

Análise pontual da turbidez

Para se verificar o comportamento gráfico do valor da turbidez foram escolhidos pontos (Figura 2) distribuídos por todo o reservatório ao longo da margem esquerda (Bahia), região central e margem direita (Pernambuco) totalizando 75 pontos de monitoramento por satélite. Esse arranjo espacial dos pontos longitudinalmente e transversalmente visa entender o comportamento dos parâmetros de qualidade de água facilitando a comparação entre pontos e sua relação com o meio externo ao reservatório como por exemplo classes de solo, uso e cobertura do solo, níveis de degradação e ocorrência de eventos climáticos como precipitação.

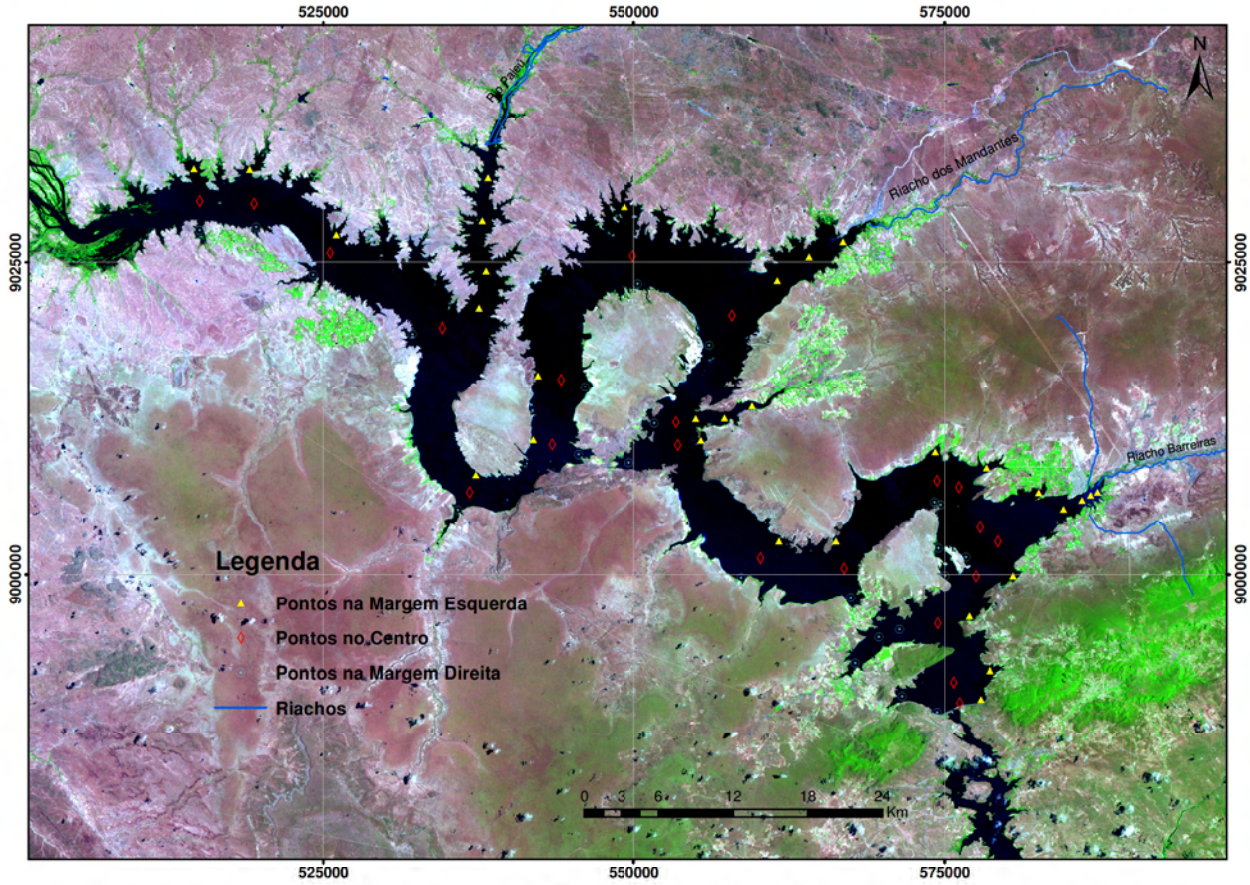

Figura 2. Localização dos pontos de monitoramento por sensoriamento remoto.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos 75 pontos estabelecidos geograficamente na área de estudo, foram verificados os valores da turbidez e plotados em gráfico (Figura 3). Nessa Figura são plotadas as três linha longitudinais, sendo uma na margem direita, outra na região central, e a última na margem esquerda. As entradas de riachos são indicadas com setas, em que as siglas RP, RM, LB, RB e RC, representam respectivamente o Rio Pajeu, Riacho dos Mandantes, Riacho no Limão Bravo, Riacho Barreiras e Riacho Canoas. Esse último localizado na margem direita, estado da Bahia.

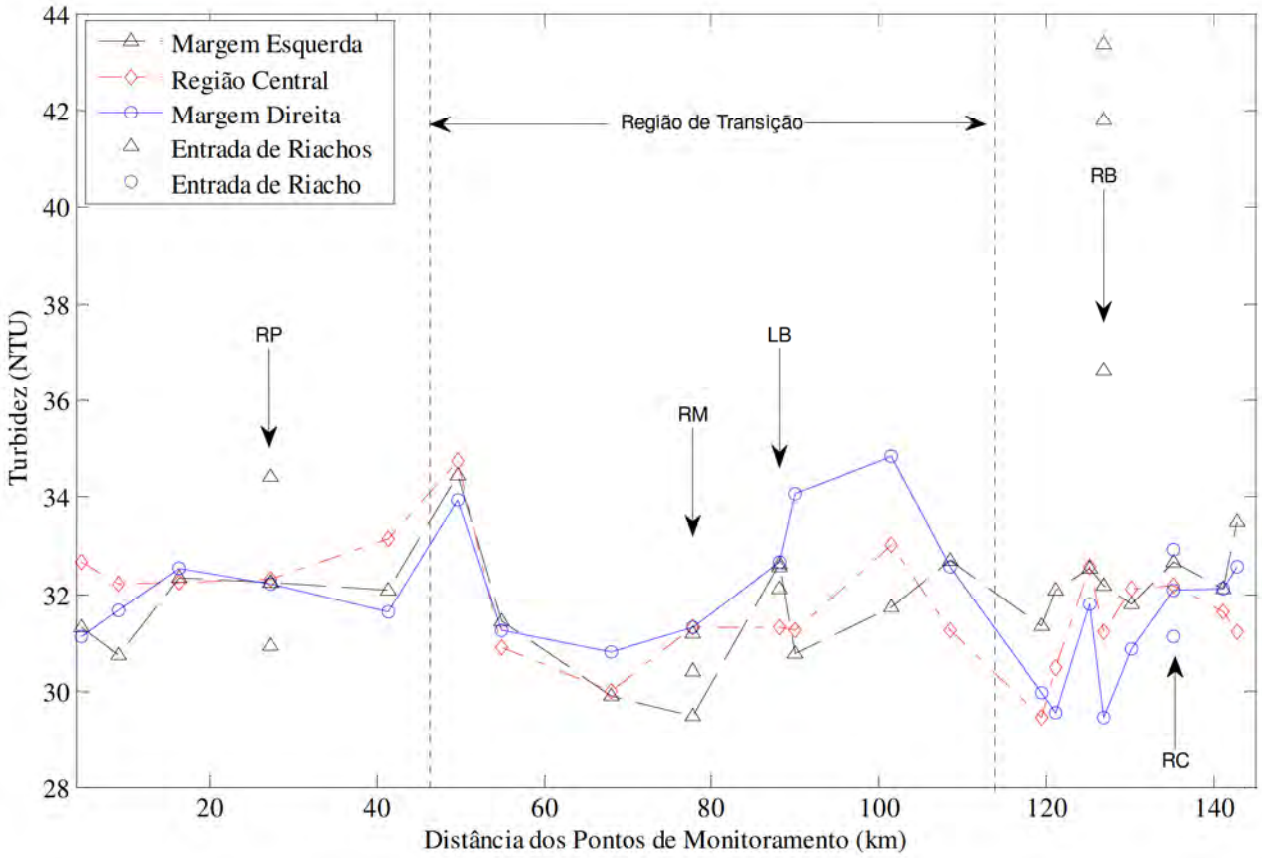

Figura 3. Perfil da turbidez ao longo do reservatório para data de passagem de 02 de outubro de 2010.

Observa-se pela gráfico da Figura 3 há variação na turbidez da área fluvial para lacustre. Para os pontos localizados na região fluvial ocorreram valores entre 30,73 e 33,16 NTU, enquanto que para região de transição os valores variaram de 29,5 a 34,84 NTU, já para zona lacustre o valor da turbidez foi de 29,46 a 43,36 NTU. Essa variação entre as regiões limnológicas pode indicar a dinâmica e complexidade do reservatório por ter diversos afluentes e variações no tipo de uso do solo e ocorrência de diferentes classes de solo. O alto valor da turbidez para a região à montante é devido a contribuição do riacho barreiras, visto que nessa microbacia ocorrem solos argilosos e de alta susceptibilidade a erosão.

Com a espacialização da turbidez por meio do programa Spring 5.2, utilizando a ferramenta LEGAL, gerou-se o mapa da distribuição espacial da turbidez no reservatório de Itaparica (Figura 4).

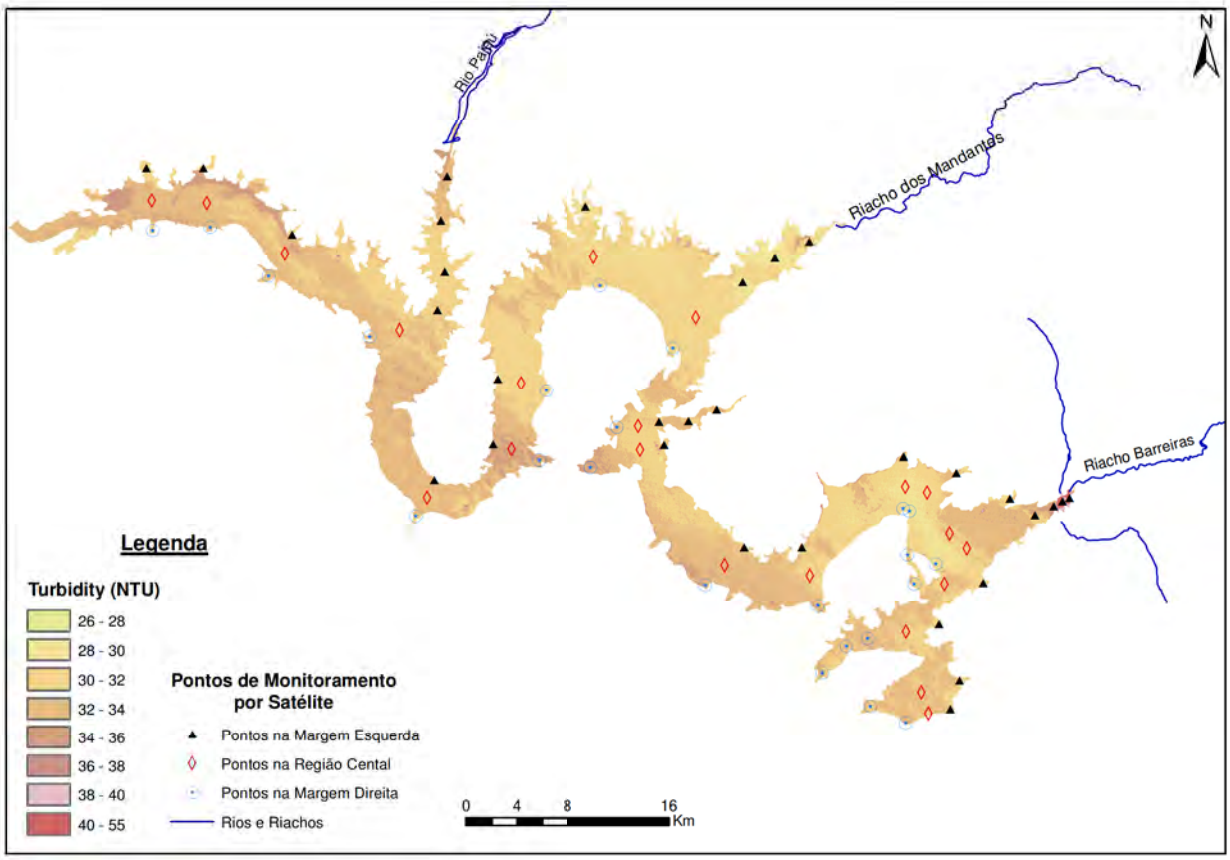

Figura 4. Distribuição da turbidez em NTU.

A área do reservatório é de 828 km^2 e a área analisada considerando a imagem de 2010 foi de 644,36 km^2. Além do reservatório não estar na sua capacidade total, foi também considerado um recuo em média de 90 metros de forma a evitar mistura de pixels. Conforme a Figura 4, observa-se que a classe de 40 a 55 NTU ocorre na entrada do riacho barreiras, visto que nessa região há ocorrência de solos argilosos e com alto nível de erosão. A maior área do reservatório está na classe entre 30 e 32 NTU e entre 32 e 34 NTU, conforme visto na Tabela 1 que mostra as áreas de cada classe, bem como as estatísticas descritivas. A primeira classe (26-28) não foi representada devido apresentar um área muito pequena (0,011 km^2).

Tabela 1. Áreas e estatística descritiva da concentração de clorofila considerando as classes da Figura 4.

	Áreas		Estatísticas (NTU)					
Classe	Km^2	%	Min	Max	Méd	Med	Desv	Mod
]28 - 30]	32,25	5,00	28,02	29,96	29,52	29,51	0,37	29,51
]30 - 32]	294,00	45,62	30,00	31,97	31,14	31,27	0,51	31,31
]32 - 34]	281,32	43,66	32,002	33,98	32,66	32,62	0,49	32,62
]34 - 36]	32,95	5,11	34,005	35,98	34,54	34,43	0,46	34,02
]36 - 38]	2,00	0,31	36,00	37,98	36,69	36,63	0,48	36,36
]38 - 40]	0,84	0,13	38,003	39,99	39,09	39,18	0,54	39,18

]40 - 55]	0,98	0,15	40,01	54.26	41,83	41,40	1,72	40,45
	644,34							

O valor mínimo da turbidez para todo o corpo hídrico foi de 27,98 NTU e o máximo de 54,26 NTU. Esse alto valor de turbidez pode está associada a áreas degradadas que localizadas no riacho barreiras que ocorrem na margem direita do reservatório. Esse valor está contido na segunda menor classe que representa menos de 1% do reservatório (Tabela 1). O cômputo da estatística descritiva geral mostra que o valor médio da turbidez foi de 31,94 NTU, sendo a mediana de 31,84 NTU, a moda apresentou valor de 32,62 NTU e o valor do desvio padrão foi de 1,29 NTU. Para se ter uma noção da quantidade e distribuição da turbidez, foi gerado um histograma para todo o reservatório (Figura 5) considerando as classes especificadas no mapa de turbidez.

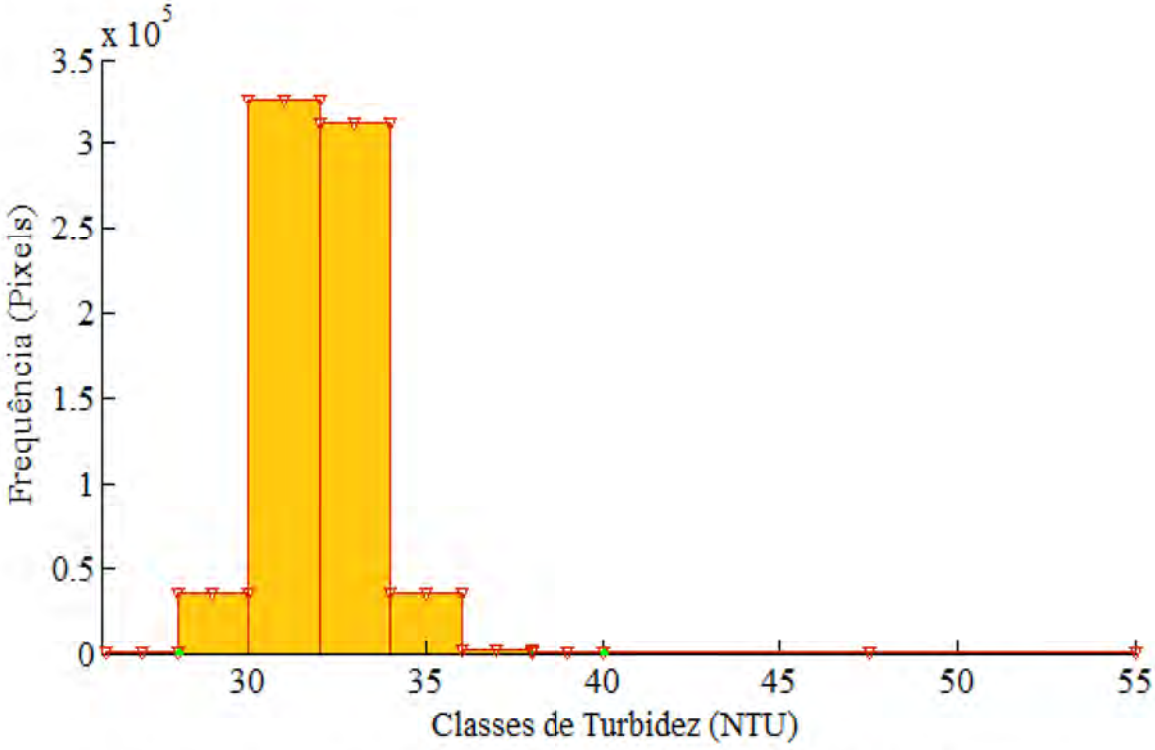

Figura 5. Histograma de distribuição da turbidez no reservatório de Itaparica.

O histograma foi gerado com base nas oito classes e em cada barra do histograma está marcado o ponto central de cada classe de turbidez. Observa-se que a classe que contem a maior quantidade de pixels foi a classe de 30-32 NTU, e conforme visto no histograma o reservatório está abaixo do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/ 2005, que é de 100 NTU para águas tipo II.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em função do modelo aplicado, observa-se que o reservatório encontra-se abaixo do limiar estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005 para o parâmetro turbidez, considerando a data de passagem do satélite.

A distribuição espacial da turbidez não apresentou um padrão de continuidade espacial, apresentado classes descontinuas em todo o reservatório.

Uma próxima etapa será a validação do modelo para o reservatório de Itaparica considerando as diversas épocas do ano e também, levando em consideração a resolução temporal do satélite e hora de passagem.

As áreas localizadas na entrada do riacho barreiras apresentam os maiores valores de turbidez, enquanto que áreas no reservatório localizadas na entrada do riacho dos mandantes apresentam os menores valores. Isso é reflexo do tipo de solo de cada microbacia, visto que a microbacia do riacho barreiras é predominantemente de solos argilosos susceptíveis à erosão, enquanto que a microbacia do riacho dos mandantes é predominantemente de solos arenosos.

AGRADECIMENTOS

Este estudo faz parte da tese do primeiro autor interligada com o programa de pesquisa teuto-brasileiro INNOVATE (Interplay among multiple uses of water reservoirs via innovative coupling of substance cycles in aquatic and Terrestrial Ecosystems) e é apoiado pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa da Alemanha. A bolsa de doutorado sandwich é financiada pelo CNPq/DAAD (Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico).

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E.; BARBOSA, C.; STECH, J.; NOVO, E.; SHIMABUKURO, Y. (2009). Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity Distributions. Environmental Modelling & Software, v. 24, pp.1051–1061.

ALLEN, R.G; TASUMI, M.; TREZZA, R. (2002). "SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)". Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation 1.

BUSTAMANTE, J.; PACIOS, F.; DÍAZ-DELGADO, R.; ARAGONÉS, D. (2009). Predictive models of turbidity and water depth in the Donana marshes using Landsat TM and ETM+ images. Journal of Environmental Management, v.90, pp.2219-2225.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. (2003). "Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures ans Postcalibration Dynamic Ranges". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing v. 41, 11.

CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. http://www.chesf.gov.br. Acesso em: 07/06/2012.

CHOUBEY, V. K.; SUBRAMANIAN, V. (1992). Estimation of suspended solids using Indian remote sensing satellite-la data: a case study from central India. International Journal of Remote Sensing, v.13, pp.1473- 1486.

DÍAZ-DELGADO, R.; BUSTAMANTE, J.; ARAGONÉS, D.; PACIOS, F. (2006). Determining water body characteristics of Donana shallow marshes through remote sensing. In: IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006, IGARSS 2006, pp. 3662-3663.

HADJIMITSIS, D. G.; HADJIMITSIS, M. G.; CLAYTON, C.; CLARKE, B. A. (2006). Determination of Turbidity in Kourris Dam in Cyprus Utilizing Landsat TM Remotely Sensed Data. Water Resources Management, v.20, pp.449–465.

KUTSER, T. (2012). The possibility of using the Landsat image archive for monitoring long time trends in coloured dissolved organic matter concentration in lake waters. Remote Sensing of Environment , v.123, pp. 334–338.

MORENO-MADRINAN, M. J.; AL-HAMDAN, M. Z.; RICKMAN, D. L.; MULLER-KARGER, F. E. (2010). Using the Surface Reflectance MODIS Terra Product to Estimate Turbidity in Tampa Bay, Florida. Remote Sensing, v.2, pp.2713-2728.

NELLIS, M. D.; HARRINGTON JR., J. A.; WU, J. (1998). Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993. Geomorphology, v.21, pp. 281-293.

SALDÍAS, G. S.; SOBARZO, M.; LARGIER, J.; MOFFAT, C.; LETELIER, R. (2012). Seasonal variability of turbid river plumes off central Chile based on high-resolution MODIS imagery. Remote Sensing of Environment, v.123, pp.220–233.

WANG, F.; HAN, L.; KUNG, H.-T.; VAN ARSDALE, R. B. (2006). Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee. International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 23, pp. 5269–5283.

WHITLOCK, C. H.; POOLE, L. R.; USRY, J. W.; HOUGHTON, W. M.; WITTE, W. G.; MORRIS, W.D.; GURGANUS, E. A. (1981). Comparison of reflectance with backscatter and absorption parameters for turbid waters. Applied. Optics, v.20, pp.517-522.

WOODRUFF, D. L.; STUMFF, R. O.; SCOPE, J. A. (1999). Remote estimation of water clarity in optically complex estuarine waters. Remote Sensing of Environment, v.68, pp.41-52.