

ANÁLISE DA POTENCIAL RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE TURBIDEZ DA ÁGUA E A COBERTURA DO MANGUEZAL DA REGIÃO DA BAÍA DE GUANABARA

Francisca Rocha de Souza Pereira^{1,2}, Milton Kampel¹, Natália Rudorff¹, Paulo Victor Marchetto Silva¹, Vitor Galazzo¹ e Aline de Matos Valerio^{1,3}

¹ Divisão de Observação da Terra e Geoinformática - DIOTG, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Av. dos Astronautas, 1.758 - 12227-010 - São José dos Campos – SP, Brasil. E-mail: {franspereira; vitorgalazzo}@gmail.com; {milton.kampel; natalia.rudorff; aline.valerio}@inpe.br; paulovictor_msilva@hotmail.com; ²EcoAct/Atos, Av. das Nações Unidas, 12.901– 04578-910 – SP; ³ Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, 13400-970, Piracicaba -SP.

RESUMO

Técnicas de sensoriamento remoto são amplamente utilizadas para estimar parâmetros de qualidade da água como a turbidez e a concentração de clorofila, a partir de dados da cor da água. Manguezais são ecossistemas costeiros que contribuem para a retenção de sedimentos, filtragem da água e controle da poluição. O objetivo do presente estudo é utilizar dados de satélite multitemporais de média resolução espacial e técnicas de sensoriamento remoto para analisar possíveis relações entre um índice de turbidez da água com a cobertura do manguezal na região da Baía de Guanabara. O resultado indicou uma relação inversa mostrando o aumento da área de mangue e índices de vegetação e diminuição do índice de turbidez da água ao longo do período de estudo. Enfatiza-se a importância da preservação do ecossistema manguezal que mesmo estando inserido numa região com forte influência urbana ainda provê muitos benefícios ambientais e sociais.

Palavras-chave — Qualidade da água, turbidez, manguezal, Landsat, Baía de Guanabara.

ABSTRACT

Remote sensing techniques are widely used to estimate water quality parameters such as turbidity and chlorophyll concentration from water color data. Mangroves are coastal ecosystems that contribute to sediment retention, water filtration and pollution control. The aim of the present study is to use medium spatial resolution multitemporal satellite data and remote sensing techniques to analyze possible relationships between a water turbidity index and mangrove cover in the Guanabara Bay region. The result indicated an inverse relationship with increase in mangrove area and vegetation indices and decrease in water turbidity index throughout the study period. It emphasizes the importance of preserving the mangrove ecosystem which, even being inserted in a region with strong urban influence, still provides many environmental and social benefits.

Key words — Water quality, Turbidity, Mangrove, Landsat, Guanabara Bay.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto orbital permite a obtenção de séries temporais de dados ambientais e meteoceanográficos com grande cobertura geográfica e alta resolução espacial e temporal. O uso de séries temporais de produtos de satélite possibilita a análise de padrões de variabilidade espacial e temporal para a caracterização ambiental de regiões costeiras e oceânicas [1].

Parâmetros da qualidade da água estimados com dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados como indicadores ambientais das mudanças ao longo do tempo em ambientes aquáticos costeiros, como em estuários [2], e podem contribuir para relacionar e avaliar os possíveis estressores ambientais e antrópicos [3]. O uso de sensoriamento remoto para monitoramento da cor e turbidez da água em regiões costeiras e estuarinas é relevante como provedor de indicadores de qualidade da água e caracterização bio-óptica desses ambientes. A turbidez da água pode ser estimada usando dados de sensoriamento remoto por meio de algoritmos específicos [4][1].

As regiões litorâneas do Sudeste, mais especificamente na Baía de Guanabara (GB) são caracterizadas pela ocupação histórica, crescimento urbano, também diversas atividades industriais e petrolíferas [5]. Isso resulta em muitos estressores ambientais que impactam os estuários, os manguezais, os ecossistemas costeiros, causando também impactos sociais [5] [6].

Manguezais são ecossistemas costeiros que contribuem para a retenção de sedimentos, filtragem da água e controle da poluição. Os remanescentes florestais dos manguezais da Baía de Guanabara têm sido alvo de estudos para a caracterização estrutural, estimativa da biomassa, dinâmica do ecossistema, monitoramento e mapeamento da vegetação [6] [7]. A floresta de mangue desta região apresenta alta diversidade estrutural como reflexo da ação humana direta ou indireta, apresentando diferentes graus de degradação e estágios de regeneração [6].

O objetivo do presente estudo é utilizar dados de satélite multitemporais de média resolução espacial e técnicas de sensoriamento remoto para analisar possíveis relações entre um índice de turbidez da água com a cobertura e índices espectrais do manguezal na região da Baía de Guanabara.

Este trabalho é uma contribuição do Projeto Santos – Caracterização Ambiental Regional da Bacia de Santos (PCR-BS) - coordenado pelo PETROBRAS.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A região de estudo (Figura 1) se localiza na Bacia da Baía de Guanabara, Estado do Rio de Janeiro, Brasil, contemplando a área de cobertura do manguezal na parte continental e o espelho d'água no interior da Baía de Guanabara e região costeira adjacente. Foram obtidas séries temporais dos dados descritos a seguir para a região de estudo:

Dados de cobertura do manguezal e apicuns foram obtidos do MapBiomas coleção 6, entre 1984- 2020 [8]. Os mapas foram processados no Google Earth Engine (GEE) e exportados em formato *raster*. Posteriormente foram transformados em formato *shapefile* e recortados para a área de interesse da Bacia Hidrográfica (Figura 1) da Baía de Guanabara. Os polígonos de cada classe de uso do solo foram agrupados e calculadas as respectivas áreas por ano. A delimitação da bacia hidrográfica da Baía de Guanabara utilizada no presente estudo foi obtida pela Agência Nacional de Águas (ANA, <https://dadosabertos.ana.gov.br/>).

Imagens Landsat 5 foram obtidas diretamente do GEE, depois de disponibilizadas pelo serviço geológico dos EUA (USGS), coleção 2. Essas são imagens referentes à reflectância da superfície geradas pelo sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM), corrigidas atmosféricamente utilizando o LEDAPS [9] e com aplicação de máscaras de nuvens e sombras (CFMASK). As imagens são ortorretificadas com 30 m de resolução, compreendendo o período de 1984 – 2012. Foram utilizadas somente imagens com $\leq 10\%$ de cobertura de nuvens.

Imagens Landsat 8 também foram obtidas diretamente do GEE, a partir da coleção 2 do USGS. Essas imagens de reflectância da superfície foram derivadas do sensor Operational Land Imager (OLI), corrigidas atmosféricamente utilizando o LaSRC [10] e com aplicação de máscaras de nuvens e sombras (CFMASK). As imagens são ortorretificadas com 30 m de resolução, considerando o período 2013 – 2020. Foram utilizadas imagens com $< 10\%$ de cobertura de nuvens.

Com base nos polígonos de área de cobertura do manguezal para cada ano foram também calculados os índices espectrais para cada data das imagens Landsat 5 e 8, e foram extraídos os valores médios para cada índice espectral, tais como: NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index* $(\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red})$; GCVI – *Chlorophyll Index Green* [11]: $(\text{Nir}/\text{Green})-1$; VDVI – *Green leaf index*: $= (2*\text{Green}-\text{Red}-\text{Blue})/(2*\text{Green}+\text{Red}+\text{Blue})$; MNDWI: *Modified Normalized Difference Water Index* – [12]: $(\text{Green}-\text{SWIR1})/(\text{Green}+\text{SWIR1})$; NDMI *Normalized Difference Mangrove Index* – [13] : $(\text{SWIR2} - \text{Green})/(\text{SWIR2}+\text{Green})$.

O Índice de turbidez foi calculado por meio de um algoritmo semi-analítico desenvolvido por Dogliotti et al. [4]

e implementado no ambiente GEE. Este algoritmo pode ser aplicado globalmente, sem a necessidade de ajustes regionais, como no caso de estimativas do total de sólidos em suspensão [4]. O algoritmo de turbidez utiliza a reflectância de duas bandas espectrais, sendo uma na faixa do vermelho (645-655 nm) para águas mais claras, e uma no infravermelho-próximo ou NIR (859-865 nm) para águas mais turbidas, possibilitando a geração de séries temporais em uma base pixel-a-pixel. Além dos mapas de turbidez e com a finalidade de indicar possíveis mudanças ambientais e variações na cor da água foram geradas razões de bandas conforme aplicadas em Bugnot et al. [2]. Os índices de cor da água foram calculados utilizando as razões de bandas Azul/Vermelho, Azul/Verde e Verde/Vermelho. A diminuição da razão azul/vermelho indica aumento na turbidez, pois a diminuição da reflectância no azul indica maior absorção de constituintes biogênicos (fitoplâncton, matéria orgânica dissolvida colorida e particulada), e o aumento da reflectância no vermelho, a maior concentração de sedimentos em suspensão. Ainda de acordo com a metodologia adaptada de Bugnot et al. [2], foram extraídos os índices espectrais, índice de turbidez e reflectâncias de sensoriamento remoto de um conjunto de ~2950 dados aleatórios gerados para as imagens Landsat. A região entre-marés foi mascarada, utilizando o produto Global Intertidal [14] disponível na plataforma GEE. Posteriormente, procedeu-se com uma filtragem excluindo os valores de turbidez acima do percentil 99 para remoção de dados espúrios associados a ilhotas, embarcações e pequenas nuvens.

Com a finalidade de regionalizar espectralmente o espelho d'água da Baía de Guanabara e região costeira adjacente, foi aplicado o algoritmo de agrupamento pelo método K-médias [15] sobre as imagens referentes às médias temporais (isomédias) de Razão de bandas. A definição do número de classes ou tipos de água diferenciáveis foi obtida com uso da função NbClust [16] do pacote R. Os pontos aleatórios foram então associados um-a-um com as classes ou regiões resultantes da análise de agrupamento.

Os valores dos índices de turbidez foram relacionados estatisticamente por meio da análise de correlação de Spearman e significância (5%) com as variáveis: percentagem de cobertura de manguezal e apicuns e índices espectrais médios do manguezal. Todos os dados foram analisados estatisticamente no programa Python e RStudio[17].

3. RESULTADOS

O espelho d'água foi regionalizado em 2 regiões principais de acordo com a classificação pelo método do K-médias. Uma região (A) às águas costeiras adjacentes e outra (B) refere-se ao interior da Baía de Guanabara. A região B da Baía apresenta maior índice de turbidez que deve estar associada à proximidade do manguezal, *runoff* e descarga de efluentes da bacia hidrográfica. A água dentro da Baía recebe influência mais ao leste do manguezal da Área de Proteção

Ambiental (APA) de Guapimirim, ao fundo e meio oeste da BG recebe maior influência da área urbana do Rio de Janeiro e cidades ao entorno.

O índice de turbidez referente ao percentil 90 (Figura 1) foi obtido com a série temporal Landsat caracterizando os locais com valores de turbidez mais altos para a região de estudo. Observam-se os maiores valores de turbidez (> 40 FNU) próximos das desembocaduras de efluentes e valores menores (< 10 FNU) nas águas mais centrais da BG e próximas da desembocadura da Baía na região costeira adjacente onde recebe maior aporte de água oceânica. Observam-se maiores valores de turbidez para a região do interior da Baía de Guanabara no diagrama *box-plot* da turbidez média para a Região da Baía (RB) e região costeira adjacente (RA) (Figura 2).

Para os resultados das correlações entre os índices de vegetação do manguezal e os valores de turbidez (Figuras 3 e 4) observa-se que a percentagem da área de cobertura de manguezal apresentou correlação inversa com a turbidez. Os índices espectrais da vegetação GCVI, NDVI e VDMI apresentaram os maiores valores de correlação (-0,7) inversa com a turbidez para a região da Baía (RB). A variável percentagem da área de apicum apresentou correlação positiva com a turbidez.

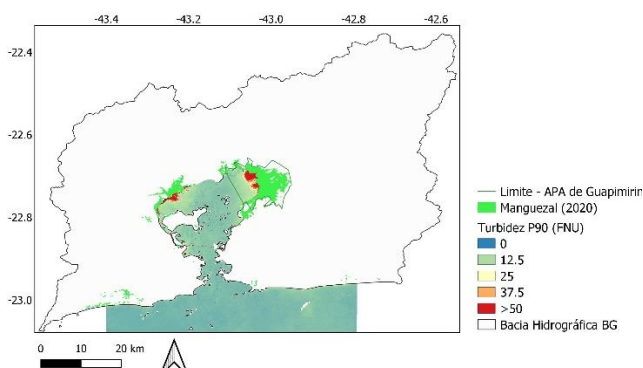


Figura 1 – Turbidez percentil 90 da BG obtida com a série temporal Landsat.

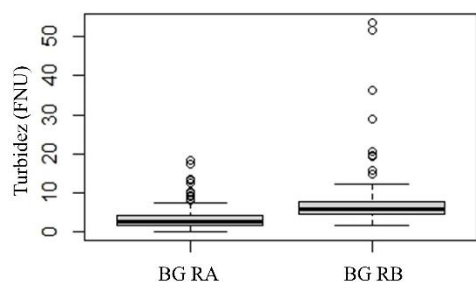


Figura 2 – Box-plot dos valores de turbidez obtidos com a série temporal Landsat.

4. DISCUSSÃO

Os resultados das análises de correlação utilizando as percentagens de cobertura do manguezal e apicum e os índices de vegetação do manguezal e índice de turbidez

obtidos com dados de sensoriamento remoto, ainda que necessite dados de campo e maior aprofundamento no estudo, indicaram potencial contribuição do ecossistema manguezal na melhora da qualidade da água da Baía. O índice de vegetação GCVI [11] é um indicador da fenologia da vegetação e pode ser relacionado com a biomassa de folhas verdes da vegetação, neste caso do manguezal. Na presente análise, tanto o aumento da área de cobertura de mangue como os índices NDVI, VDMI e GCVI indicaram correlação inversa com a turbidez, mostrando a importância do ecossistema manguezal na retenção de sedimentos, manutenção da qualidade da água e vida do estuário. A área de apicum, que apresentou uma relação direta com a turbidez, é considerada como uma zona de transição associada ao ecossistema manguezal, caracterizada por apresentar solo exposto arenoso com alta salinidade. Observa-se uma diminuição destas áreas de apicum ao longo dos anos. Isto pode ser consequência da expansão do manguezal nesta região de transição quando bordeadas por mangue ou mesmo a ocupação destas regiões por outra classe de uso do solo.

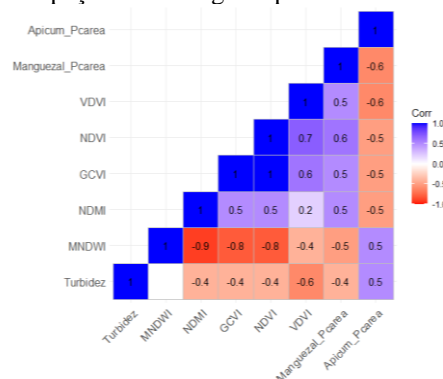


Figura 3 - Correlação de Spearman e significância (5%) para a região costeira adjacente à Baía de Guanabara.

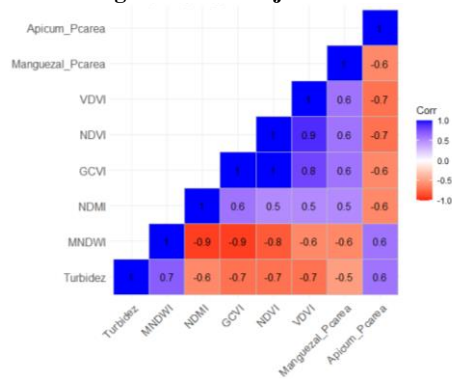


Figura 4 Correlação de Spearman e significância (5%) para a Baía de Guanabara, região da água no interior da Baía de Guanabara.

A atividade industrial e alta densidade populacional na Bacia da Baía de Guanabara, principalmente próximo a borda da Baía, gera um fluxo de esgoto que é descarregado diretamente na água da Baía e apenas uma pequena parte é tratada [18]. Devido a este histórico de forte influência da urbanização sobre a qualidade da água na Baía de Guanabara

[6][18] o manguezal mesmo estando inserido em uma região com forte influência urbana [5] ainda provê muitos benefícios para a biodiversidade e o sustento de comunidades pesqueiras. Para a classe de cobertura do manguezal observou-se uma tendência crescente de área no período de estudo. Este aumento de área pode ser devido à criação da APA de Guapimirim e maior proteção ambiental deste ecossistema. Pode-se enfatizar a importância da legislação ambiental vigente para a proteção do ecossistema manguezal, com a criação da APA, que permitiu a conservação do manguezal bem como sua recuperação em algumas áreas de mangue mais desenvolvidos.

5. CONCLUSÕES

Na presente análise observou-se a relação de um índice de turbidez da água na região da Baía de Guanabara derivado de dados temporais Landsat com a área de cobertura por manguezais e apicuns no entorno da Baía de Guanabara por meio de índices de vegetação e percentagem de cobertura do manguezal e apicum. Os resultados indicaram correlação inversa com o aumento da cobertura por manguezal e diminuição do índice de turbidez na série temporal. Para as análises futuras pretende-se incluir variáveis ambientais, como precipitação, vento e classes de infraestrutura urbana. Pretende-se ainda, gerar modelos de regressão multivariada com todas as variáveis consideradas e aplicar a metodologia proposta em outros estuários brasileiros. Enfatiza-se aqui a importância da preservação do ecossistema manguezal que mesmo estando inserido numa região com forte influência urbana ainda provê muitos benefícios ambientais e sociais. As políticas públicas devem sempre visar a recuperação e conservação de estuários e ecossistemas costeiros.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto PETROBRAS Santos (PCR-BS), Agência Nacional do Petróleo (ANP) e IBAMA.

9. REFERÊNCIAS

[1] N. Rudorff, C. Rudorff, M., Kampel, Et Al. Remote Sensing Monitoring Of The Impact Of A Major Mining Wastewater Disaster On The Turbidity Of The Doce River Plume Off The Eastern Brazilian Coast. *Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing*, V. 145, PP. 349-361, 2018.

[2] A. B. Bugnot, M. B. Lyons, P. Scanes, G.F. Clark, S. K. Fyfe, A. Lewis, and E. L. Johnston. A novel framework for the use of remote sensing for monitoring catchments at continental scales. *Journal of environmental management*, V. 217, PP. 939-950, 2018.

[3] M. McCarthy, F. Muller-Karger, D. Otis, and P. Méndez-Lázaro, Impacts of 40 years of land cover change on water quality in Tampa Bay Florida. *Cogent Geoscience*, V.4, PP.1. 2018.

[4] A. Dogliotti, K. G. Ruddick, B. Nechad, D. Doxoran, E. Knaeps. Single Algorithm To Retrieve Turbidity From Remotely Sensed

Data In All Coastal And Estuarine Waters. *Remote Sensing of Environment*, V. 156, PP.157-169, 2015.

[5] A. Soares-Gomes, B.A.P. Gama, J.A. Baptista Neto, D.G. Freire, R.C. Cordeiro, W. Machado, Bernardes M.C., Coutinho R., Thompson, F.L. Pereira R.C. An environmental overview of Guanabara Bay, Rio de Janeiro. *Regional Studies in Marine Science*, V. 8, PP. 319-330, 2016.

[6] M. L. G. Soares, F. D. O. Chaves, F. Moreira, C. Milton. Diversidade Estrutural de Bosques de Mangue e sua Relação com Distúrbios de Origem Antrópica: o caso da Baía de Guanabara (Rio de Janeiro). *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*, V. 26, PP. 101–116, 2003.

[7] F. R. S. Pereira, M. Kampel, M.L.G. Soare, G. D. Estrada, C. Bentz, G. Vincent. Reducing uncertainty in mapping of mangrove aboveground biomass using airborne discrete return LiDAR data. *Remote Sensing*, V.10, PP.637, 2018.

[8] MapBiomass Brasil. Project MapBiomass — Collection 6 of Brazilian Land Cover and Use Map Series. 2021

[9] J.G. Masek, E.F. Vermote, N.E. Saleous, R. Wolfe, F.G. Hall, K.F. Huemmrich, F. Gao, J. Kutler, AND T.K. Lim.. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, V. 3(1), PP. 68-72, 2006.

[10] E. Vermote, C. Justice, M. Claverie, AND B. Franch. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, V. 185, PP. 46-56, 2016.

[11] A. A. Gitelson, A. Vinã, T. J. Arkebauer, D. C. Rundquist, G. Keydan, AND B. Leavitt, 2003 Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies, *Geophysical Research Letters*, V.30(5), PP. 1248, 2003.

[12] HQ. Xu Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, V. 27, PP. 3025–3033, 2006.

[13] T. Shi, J. Liu, Z. Hu, H. Liu, J.e Wang AND G. Wu. New spectral metrics for mangrove forest identification, *Remote Sensing Letters*, V. 7:9 PP.885-894, 2016.

[14] N. J. Murray, S. R. Phinn, M. DeWitt, R. Ferrari, R. Johnston, M. B. Lyons, N. Clinton, D. Thau AND R. A. Fuller. The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, V. 565, PP. 222-225, 2019.

[15] J. MacQueen. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, California*, V. 1, PP. 281–297, 1967.

[16] M. Charrad, N. Ghazzali, V. Boiteau, A. Niknafs. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, V. 61(6), PP.1-36, 2014.

[17] R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2021.

[18] A.S. Fries, J. P. Coimbra, D. A. Nemazie, R. M. Summers, J.P. S. Azevedo, S. Filoso, M. Newton, G. Gelli, R. C. N. Oliveira, M. A. R. Pessoa, W. C. Dennison. Guanabara Bay ecosystem health report card: Science, management, and governance implications. *Regional Studies in Marine Science*, V. 25, PP.1-17, 2019.