

UTILIZAÇÃO DO ÍNDICE DE DIFERENÇA NORMALIZADA DA ÁGUA (NDWI) NA IDENTIFICAÇÃO DE INUNDAÇÕES COSTEIRAS GERADAS POR TEMPESTADES

Silvio Roberto de Oliveira Filho¹

Fabiane Bertoni dos Reis²

Thiago Gonçalves Pereira³

Guilherme Borges Fernandez⁴

Eduardo Manuel Rosa Bulhões⁵

1. Universidade Federal Fluminense - Departamento de Geografia - Av. Milton Tavares de Souza, s/nº, Niterói - RJ, Brasil (silviooliveira@id.uff.br)
2. Universidade Federal Fluminense - Departamento de Geologia e Geofísica Marinha - Av. Milton Tavares de Souza, s/nº, Niterói - RJ, Brasil (fabianebertoni@id.uff.br)
3. Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Departamento de Geografia Física - R. São Francisco Xavier, 524, Rio de Janeiro - RJ, Brasil (thiagopereira.uerj@gmail.com)
4. Universidade Federal Fluminense - Departamento de Geografia - Av. Milton Tavares de Souza, s/nº, Niterói - RJ, Brasil (guilhermefernandez@id.uff.br)
5. Universidade Federal Fluminense - Departamento de Geografia - R. Sen. Viana, Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil (eduardobulhoes@id.uff.br)

ABSTRACT

Coastal storms are disturbances of maritime conditions, induced by meteorological factors, which can promote different impacts on the coast, including coastal inundations in the most energetic events. The present work aims to apply the Normalized Water Difference Index (NDWI), in high spatial resolution images, in order to identify coastal inundation caused by a sequence of storms, in April 2020, in the east section at Massambaba beach, in the north-central coast of Rio de Janeiro. To topographically contextualize the area, a digital elevation model was elaborated through aerophotogrammetry with an Unmanned Aircraft Vehicle (UAV) aided by support points, in the form of targets, measured with GNSS receivers. To identify the flooded area, the NDWI was used in PlanetScope images, on five different dates, quantifying the variation of the flooded area over time. The results showed that the reverse of the foredunes in this sector of Massambaba beach is flooded during storm events due to the increase in the wave height and to the topographic characteristics, which allow overwash process in the foredunes, in areas with low altimetry, where the water is confined between the foredunes and the inland because the area is topographically lower, in addition to occur the soil saturation. The use of NDWI proved to be powerful tool in the identification and quantification of coastal inundations, however, it does have limitations which can be take mistakes interpretations, as the presence of clouds in the orbital images, that are attributed as water by the index.

Keywords: UAV, coastal inundation, storm impact, overwash, remote sensing.

INTRODUÇÃO

Tempestade costeira pode ser definida como uma perturbação das condições marítimas (ondas e nível da água), induzidas meteorologicamente, com potencial de alterar significativamente a morfologia da costa (Harley, 2016), traduzindo-se geralmente, em impactos erosivos, e nos casos mais extremos, inundações costeiras.

Tempestade em zonas costeiras muitas vezes ocorrem de forma intermitente, separadas por um pequeno intervalo de tempo (2 a 3 dias), e são comumente referidas como tempestades em grupo (*storm group*), tempestades agrupadas (*storm cluster*) ou

sequência de tempestades (*sequence storm*), entretanto, são analisadas como uma única tempestade (Castelle e Harley, 2020).

Em trabalhos relacionados às tempestades costeiras, geralmente, as análises são direcionadas para perdas volumétricas da praia emersa (Sopkin *et al.*, 2014; Bulhões *et al.*, 2016; Harley *et al.*, 2017; Oliveira Filho *et al.*, 2020), recuo da linha de costa (Gervais *et al.*, 2012; Forbes *et al.*, 2004; Fernandez *et al.*, 2015), destruição de benfeitorias públicas e privadas (Muehe *et al.*, 2001; Lins-de-barros, 2005; Pereira *et al.* 2017), e mais raramente, a quantificação de áreas impactadas por inundações costeiras (Jiménez *et al.*, 2012; Leal-Alves *et al.*, 2020), geralmente após a passagem de furacões (Sambah e Miura, 2016).

O grande avanço das geotecnologias, principalmente relacionado ao sensoriamento remoto, tem propiciado o desenvolvimento de diversos estudos relacionados à inundações, principalmente em ambientes fluviais (Memon *et al.*, 2015; Munasinghe *et al.*, 2018; Sivanpillai *et al.*, 2020), utilizando o índice de diferença normalizada da água (NDWI - *Normalized Difference Water Index*). O NDWI foi proposto por McFeeters (1996), para identificação de corpos hídricos utilizando apenas as bandas verde e infravermelho próximo, obtidas através de imagens orbitais.

O presente trabalho tem como objetivo aplicar o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), em imagens de alta resolução espacial (3 m/px) com o intuito de identificar áreas costeiras impactadas por inundações provocadas por uma sequência de tempestades, em abril de 2020, utilizando como área teste, o trecho leste da praia da Massambaba, litoral centro-norte fluminense, trecho indicado por Martins *et al.* (2017) como uma área suscetível ao processo de transposição de ondas de tempestade devido a baixa altimetria de parte das dunas frontais.

ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudo selecionada corresponde ao trecho leste da praia da Massambaba, situada no município de Arraial do Cabo, no litoral centro-norte do estado do Rio de Janeiro (Figura 1). As características morfodinâmicas são de praia intermediária para dissipativa (Maluf *et al.*, 2016), e está diretamente exposta às ondas de mau tempo (SW-S-SE) e abrigadas de ondas de bom tempo (NE-E), de acordo com Klumb-Oliveira *et al.* (2015). Os ventos preferenciais são de NE, com ventos, geralmente, de SO, associados a passagem de frentes frias. Em relação as características das dunas frontais, estas alcançam até 7 m nas porções mais altas, e 2,4 m nas áreas mais baixas (Martins *et al.*, 2017), sendo essas áreas onde ocorrem, preferencialmente, o processo de transposição de ondas (Moulton *et al.*, 2013), responsável por transportar água e sedimentos para o reverso das dunas frontais, principalmente durante eventos de tempestade. O regime

de maré é de micromaré, semi-diúrna, com nível médio do mar em 0,68 m, de acordo com os dados da tábua de maré para o Porto do Forno, fornecida pela DHN (Diretoria de Hidrografia Nacional).



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, situada no trecho leste da praia da Massambaba, pertencente ao município de Arraial do Cabo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização topográfica foi realizada através do imageamento de um trecho da área de estudo, utilizando uma câmera acoplada a uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), e posterior processamento das imagens aéreas para geração de Modelo Digital de Elevação (MDE), através da técnica *Structure from Motion* (SfM). Para isso, foram selecionados em campo, pontos de apoio espalhados na forma de alvos aerofotogramétricos, onde foram medidos posição e altimetria com auxílio de um par de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), servindo para controle e verificação planialtimétrica do ortofotomosaico e do MDE.

A identificação e quantificação da área inundada pela sequência de tempestades ocorridas em abril de 2020 foi realizada através da aplicação do índice de diferença normalizada da água (NDWI) utilizando imagens orbitais de alta resolução espacial (3 m/píxel), disponibilizadas gratuitamente pela empresa *Planet*, através do programa de educação e pesquisa (Planet Team, 2017). Foram selecionadas cinco datas para

representar o período pré tempestade (03/04/20), durante a tempestade (05/04/20; 14/04/2020; e 28/04/2020), e o pós tempestade (10/05/2020).

A utilização de imagens orbitais necessita de uma série de procedimentos para torná-las comparáveis ao longo do tempo, uma vez que os sensores orbitais geralmente fornecem imagens com valores de pixels associados a um número digital ou a radiância, que correspondem a quantidade de luz captada pelo sensor sobre um ponto na superfície. A quantidade de luz é variável ao longo do dia, ou seja, valores de pixels em cenas distintas podem ser completamente diferentes sem que tenha ocorrido, de fato, alguma mudança. Para tornar uma série de imagens comparáveis, mesmo cenas de diferentes sensores, é necessário converter os valores de radiância em refletância, que corresponde a proporção entre o fluxo de radiação eletromagnética incidente e o fluxo que é refletido.

Dessa forma, todas as bandas das imagens selecionadas foram transformadas, no programa QGIS, primeiro de número digital (DN – *Digital Number*) para radiância, multiplicando-as pelo fator de escala radiométrica (0,01), em seguida, de radiância para refletância (*Top Of Atmosphere - TOA Reflectance*), multiplicando pelo coeficiente de refletância (Figura 2A), fornecido em arquivo auxiliar junto à imagem, que varia de acordo com a distância do sol e a geometria de entrada da radiação solar.

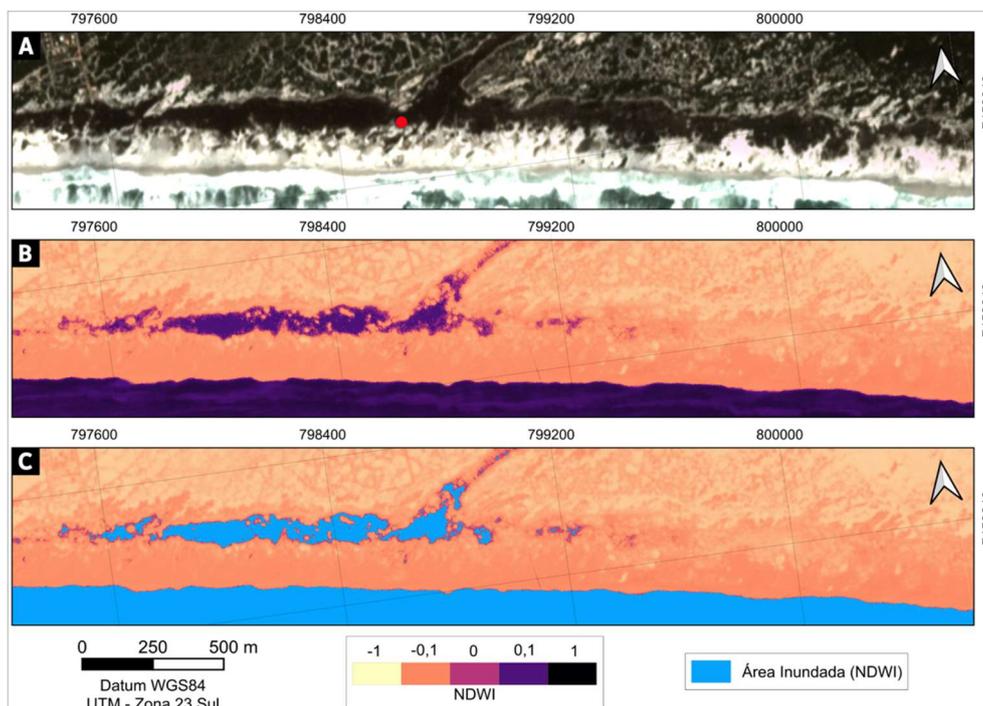


Figura 2. Exemplos dos produtos gerados a partir das imagens de satélite *PlanetScope* (4 bandas) nas diferentes fases de processamento. A) Imagem correspondendo a refletância; B) NDWI; C) Individualização dos corpos hídricos após a binarização do arquivo matricial.

Para utilização do NDWI são utilizadas apenas as bandas verde (G) e infravermelho próximo (NIR), uma vez que a banda verde tende a maximizar a refletância das

características da água e a banda infravermelho próximo tem baixa refletância em corpos hídricos e alta refletância em vegetação e solos (McFeeters, 1996). Dessa forma, os pixels da imagem resultante têm valores que podem variar de -1 a 1, onde as características da água têm valores positivos e as características de vegetação e solos tem valores negativos. O índice pode ser obtido através da equação 1:

$$NDWI = \frac{(G - NIR)}{(G + NIR)} \quad (1)$$

Após a obtenção do NDWI (Figura 2B), foi realizada a binarização dos valores de pixels de todos os arquivos matriciais, através do complemento *Threshold Vect*, do programa QGIS, onde foi definido como limiar o valor 0, ou seja, o dado de saída corresponde apenas aos pixels com valores positivos, e os negativos foram excluídos (Figura 2C). Após essa fase, somente os pixels referente a água aparecerão, entretanto, para quantificação de áreas (polígonos) é necessário realizar a transformação de arquivo matricial para arquivo vetorial, e por fim, pode ser aplicado um filtro suavizador de vetores, para retirar o aspecto serrilhado das margens dos polígonos, em decorrência da forma dos pixels (quadrado).

RESULTADOS

O MDE (Figura 3) apresentou dunas frontais com até aproximadamente 8 m (Figura 3D, linha A/A'), intercaladas por áreas mais baixas, onde o topo da barreira atinge aproximadamente 2,3 m (Figura 3E, linha B/B'). Essas áreas mais baixas no topo da barreira frontal representam os pontos de transposição pelo espraiamento das ondas, onde são depositados água e sedimentos no reverso.

Fica evidente que o reverso das dunas frontais (Figura 3B e 3C) possuem uma área mais rebaixada, onde as águas do espraiamento das ondas que transpõe a barreira, ficam confinadas, permanecendo como corpos hídricos, ainda que incipientes e temporários, entretanto, passíveis de serem identificados através de imagens orbitais de alta resolução espacial. A inundação dessa área pode ser comprovada através da fotografia oblíqua (Figura 4), durante a tempestade monitorada, em abril de 2020, onde é possível visualizar diversas áreas alagadas entre as dunas frontais e no reverso destas.

A figura 5 apresenta as características da tempestade que promoveu a inundação desse trecho da praia da Massambaba. Essa tempestade se enquadra em tempestades agrupadas, uma vez que foram observadas uma sequência de 4 eventos, mas que podem ser agrupadas como uma única, devido a proximidade entre elas.

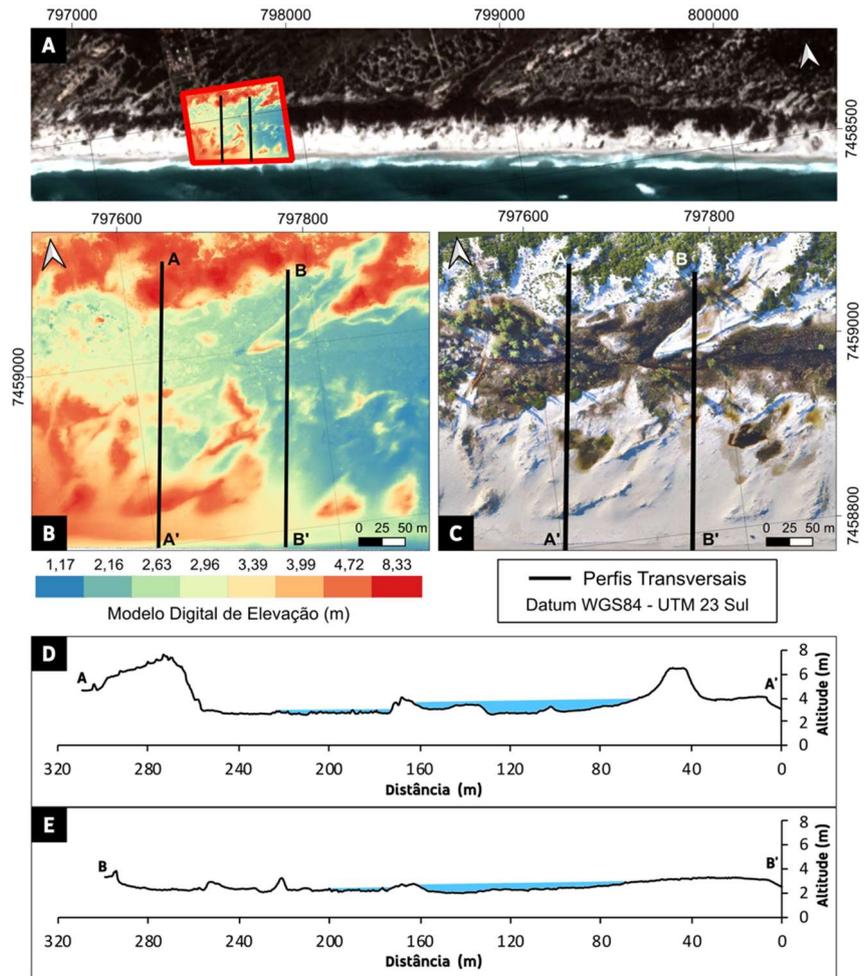


Figura 3. Em A) Localização do Modelo Digital de Elevação; B) Modelo Digital de Elevação com resolução espacial de 5 cm; C) Ortofotomosaico, com resolução de 5 cm, obtido por aerofotogrametria com ARP; D) Perfil topográfico da linha A-A'; E) Perfil topográfico da linha B-B'.



Figura 4. Fotografia oblíqua à praia da Massambaba, após uma tempestade, em 07 de abril de 2020, com áreas inundadas entre as dunas frontais e no reverso destas. Foto: Marlon Coutinho.

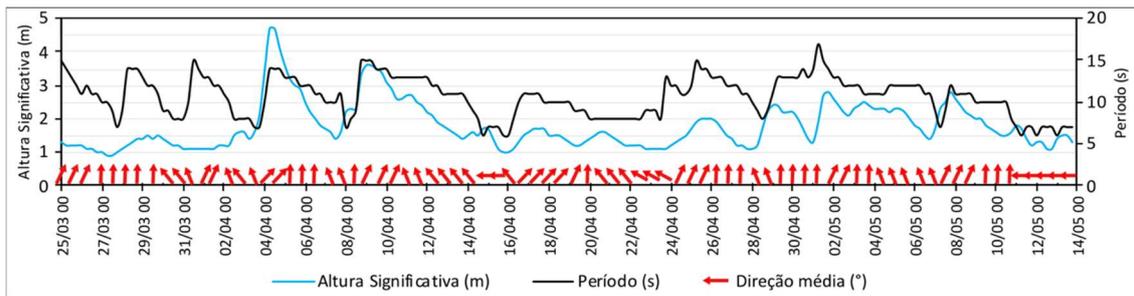


Figura 5. Caracterização das condições hidrodinâmicas antes, durante e após a sequência de tempestades.

O pico da tempestade ocorreu no dia 4 de abril, com altura significativa máxima de aproximadamente 4,7 m, período de 14 s, e direção média de SO. No dia 5 de abril houve o decaimento da energia das ondas, até o dia 8, quando novamente voltou a aumentar, atingindo outro pico entre os dias 9 e 10, com altura significativa de 3,6 m e período de 15 s, também com direção SO. Em seguida, a energia das ondas entrou em tendência de descida, gradualmente lenta, ocorrendo ainda no dia 12, alturas de ondas superiores a 2 m. Entre os dias 25 e 26 de maio as alturas de onda e período cresceram novamente, atingindo no pico 2 m e 15 s, respectivamente, com direção SSO. As características de onda passaram a oscilar com descidas e subidas na energia das ondas, até o dia 10 de maio, quando as características das ondas se estabilizaram abaixo de 1,5 m, período de 8 s e direção preferencial de E, caracterizando o retorno das condições de tempo bom.

Dentre todas as imagens analisadas, foram selecionadas cinco datas representativas das áreas inundadas pela tempestade, sem apresentação de nenhum tipo de ruído, como nuvens, que representam um grande problema para análise de imagens orbitais, principalmente em temas ligados a tempestades, devido as nuvens serem inerentes a essa condição.

A figura 6 apresenta todas as imagens utilizadas para aplicação do NDWI, sobrepostas pelos polígonos de áreas inundadas (quando for o caso). É importante ressaltar que o NDWI consegue captar todos os corpos hídricos, inclusive a água do mar, mas que para realizar o cálculo de área, foram removidos todos os corpos hídricos fora da área de estudo, além da água do mar. Um exemplo de como o NDWI retorna também a água do mar pode ser visualizado na figura 2C.

Na imagem pré-tempestade, dia 3 de abril (Figura 6A), não foram apresentadas áreas inundadas, em decorrência desta data ser anterior a tempestade. Na imagem do dia 5 de abril (Figura 6B), foi evidenciada uma grande área ocupada por inundação costeira, correspondendo à 29,92 ha. Ainda em B pode ser visualizado a extensa zona de surfe, caracterizando estar ainda sobre forte influência de tempestade.

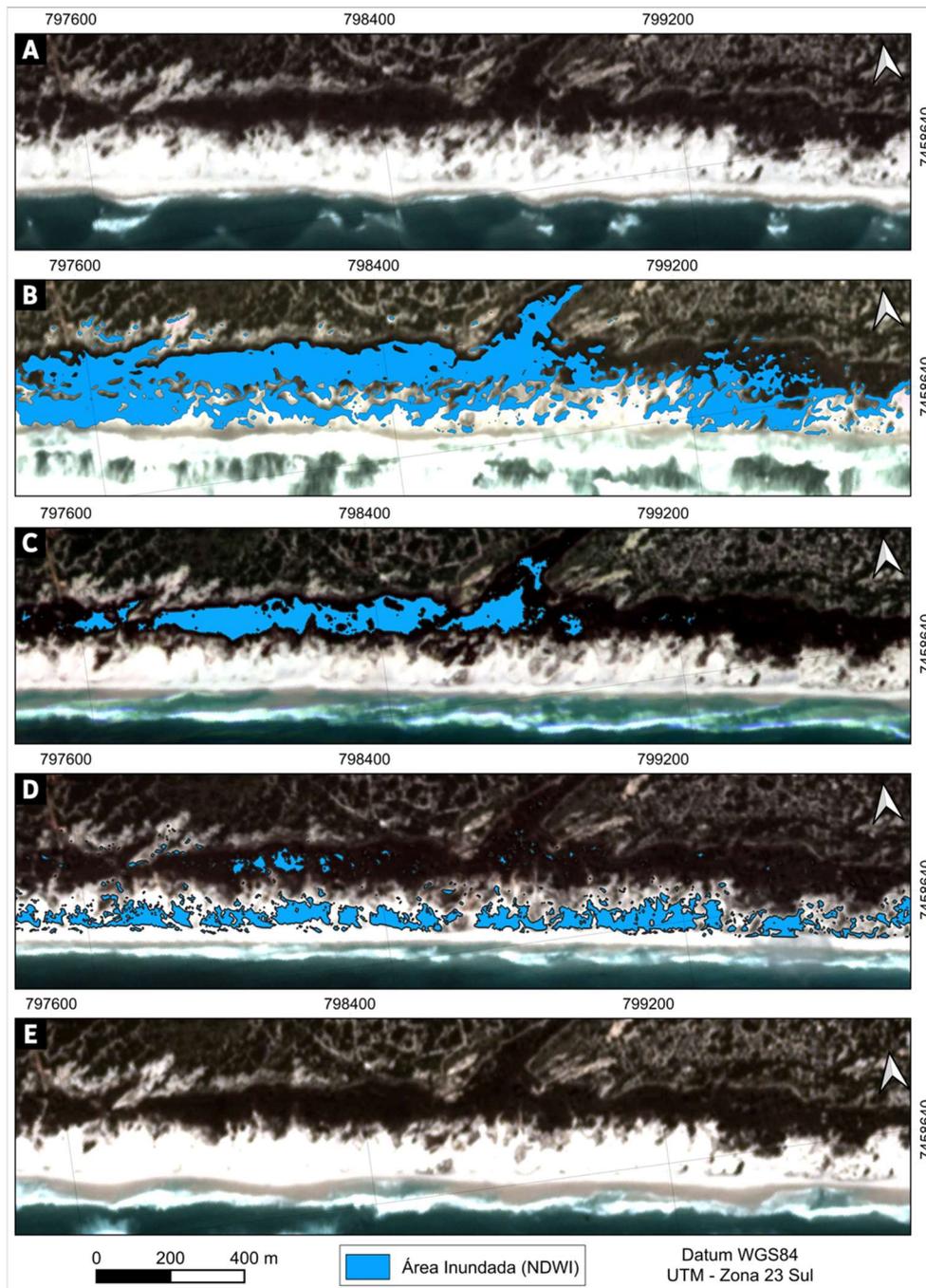


Figura 6. Representação espacial de áreas inundadas durante a sequência de tempestades ocorridas em abril de 2020. Em A) Pré tempestade (03/04/2020); B) após o primeiro pico de energia (05/04/2020); C) Após o segundo pico da tempestade (14/04/2020); D) Após o terceiro pico (28/04/2020); e, E) retorno as características de tempo bom (10/05/2020), onde não foram observadas áreas inundadas.

Na figura 6C, no dia 14 de abril, a área inundada havia reduzido de tamanho, medindo 7,6 ha. Na figura 6D, equivalente ao dia 28 de abril, ocorreu o aumento de áreas inundadas, mas que, no entanto, atingiu apenas as dunas frontais. Dessa forma, a quantificação de área inundada para essa imagem se refere apenas à área topograficamente mais rebaixada, no reverso das dunas frontais, que correspondeu a 0,72 ha, representando uma redução de aproximadamente 95% de área inundada,

mesmo durante condições de tempestade. Na última data selecionada, dia 10 de maio (Figura 6E), correspondendo ao período de retorno das condições de tempo bom, não ocorreram áreas inundadas na área de estudo.

A inundação costeira provocada pela tempestade se projetou, em média, mais de 200 m, a partir da linha de costa, atingindo o máximo no trecho central da área de estudo (Figura 6B), com distância de mais de 400 m. A distância da inundação projetada para o interior, de certa forma, foi controlada pela topografia do reverso das dunas frontais e, provavelmente, pela saturação do solo, condição a qual a infiltração cessa.

CONCLUSÕES

A análise das áreas costeiras inundadas é totalmente possível através da aplicação do NDWI, contudo, a ferramenta não aborda informações relevantes para áreas costeiras, como em relação ao estoque de areia erodido e transportado em direção à zona de surfe ou para o reverso da barreira por transposição de ondas. Apesar disso, é possível utilizar o NDWI também para avaliar variações horizontais da linha de costa, utilizando como indicador o contato água/areia, mas que não foi objeto da investigação aqui realizada.

A aplicação do NDWI apresentou resultados consistentes em relação a quantificação de áreas costeiras inundadas por eventos de tempestade. A identificação de áreas inundadas através de imagens orbitais se mostra promissora, entretanto, existem limitações do método, que podem induzir ao erro, como no caso da presença de nuvens nas imagens, as quais são atribuídas, pelo índice, como água. Dessa forma, a análise prévia das imagens é um importante passo na utilização desta ferramenta, uma vez que imagens orbitais, durante eventos de tempestades ou em datas próximas, geralmente contém elevada porcentagem de cobertura por nuvens.

Novos testes serão aplicados em áreas urbanas, com uma perspectiva de contribuição do sensoriamento remoto para gestão e planejamento de zonas costeiras urbanizadas frente a exposição e risco de inundações costeiras provocadas por tempestades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BULHÕES, E.; FERNANDEZ, G. B.; OLIVEIRA FILHO, S. R.; PEREIRA, T. G. Coastal Impacts Induced by Storm Waves between Cape Frio and Cape Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 75, n. sp1, p. 1047–1051, 3 mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.2112/SI75-210.1>
- CASTELLE, B.; HARLEY, M. D. Extreme events: impact and recovery. In: **Sandy Beach Morphodynamics**. [s.l.] Elsevier, 2020. pp. 533–556. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00022-9>
- FERNANDEZ, G.; MALUF, V.; BULHOES, E.; ROCHA, T. B. DA; PEREIRA, T. G.; OLIVEIRA FILHO, S. Impactos morfológicos e resiliência das praias no litoral do rio de janeiro: referência especial à morfodinâmica praias In: PAULA, D. P.; DIAS, J. A. (orgs.), **Ressacas do Mar / Temporais e Gestão Costeira**, Editora Premium, Fortaleza, CE, Brasil, 2015, pp. 277–329. ISBN: 978-85-7924-440-7

FORBES, D. L.; PARKES, G. S.; MANSON, G. K.; KETCH, L. A. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. **Marine Geology**, v. 210, n. 1–4, p. 169–204, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.05.009>

GERVAIS, M.; BALOUIN, Y.; BELON, R. Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions Coastline, France. **Geomorphology**, v. 143–144, p. 69–80, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.035>

HARLEY, M. Coastal Storm Definition. In: **Coastal Storms: Processes and Impacts**. [s.l.] Wiley Blackwell, 2016. p. 1–21. <https://doi.org/10.1002/9781118937099.ch1>

HARLEY, M. D.; TURNER, I. L.; KINSELA, M. A.; MIDDLETON, J. H.; MUMFORD, P. J.; SPLINTER, K. D.; PHILLIPS, M. S.; SIMMONS, J. A.; HANSLOW, D. J.; SHORT, A. D. Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–9, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05792-1>

JIMÉNEZ, J. A.; SANCHO-GARCÍA, A.; BOSOM, E.; VALDEMORO, H. I.; GUILLÉN, J. Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958–2008. **Geomorphology**, v. 143–144, p. 24–33, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.034>

KLUMB-OLIVEIRA, L. A.; PEREIRA, N. E. D. S.; LEÃO, R. R. Morfodinâmica Multitemporal Em Praia Refletiva No Litoral Centro-Norte Do Rj, Em Resposta Ao Clima De Ondas Regional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 1, 2015. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v16i1.599>

LEAL-ALVES, D. C.; WESCHENFELDER, J.; DOMINGUEZ ALMEIDA, J. C.; GUIA ALBUQUERQUE, M. DA; ALMEIDA ESPINOZA, J. M. DE; GONZAGA, B. A. Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion Approach for Flood Assessment in Coastal Channels. **Journal of Coastal Research**, v. 95, n. sp1, p. 1162, 2020. <https://doi.org/10.2112/SI95-225.1>

LINS-DE-BARROS, F. M. **Risco e vulnerabilidade à erosão costeira no município de Maricá, Rio de Janeiro**. [s.l.] Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Dissertação de Mestrado.

MEMON, A. A.; MUHAMMAD, S.; RAHMAN, S.; HAQ, M. Flood monitoring and damage assessment using water indices: A case study of Pakistan flood-2012. **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 1, p. 99–106, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.003>

MOULTON, M.; OLIVEIRA FILHO, S. R.; ROCHA, T. B.; FERNANDEZ, G. B. Foredunes of rio de janeiro coast: genesis, structure and morphology. **Journal of Coastal Research**, v. 165, n. SPEC. ISSUE 65, p. 1319–1324, 3 jan. 2013. <https://doi.org/10.2112/SI65-223.1>

MUEHE, D.; FERNANDEZ, G. B.; SAVI, D. C. **Resposta morfodinâmica de um sistema praia-antepraia a oeste do Cabo Frio exposto às tempestades de Maio de 2001**. VIII Congresso da ABEQUA, 2001.

MUNASINGHE, D.; COHEN, S.; HUANG, Y. F.; TSANG, Y. P.; ZHANG, J.; FANG, Z. Intercomparison of Satellite Remote Sensing-Based Flood Inundation Mapping Techniques. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 4, p. 834–846, 2018. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12626>

OLIVEIRA FILHO, S. R.; SANTOS, R. A.; FERNANDEZ, G. B. Erosão e recuperação de praias refletivas de alta energia impactadas por ondas de tempestade geradas por ciclone tropical. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, p. 289–312, 2020. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1455>

PEREIRA, T. G.; OLIVEIRA FILHO, S. R. DE; MORAES, C. P. R. DE A.; LESSA, A. C. P. Impacto das Tempestades de 2016 em Orla Urbanizada: Arco Praial de Piratininga, Niterói – RJ. **Revista do Departamento de Geografia**, (spe), 75–84. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132750>

Planet Team (2017). Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. San Francisco, CA. <https://api.planet.com>

SAMBAH, A. B.; MIURA, F. Spatial data analysis and remote sensing for observing tsunami-inundated areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 9, p. 2047–2065, 2016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1136450>

SIVANPILLAI, R.; JACOBS, K. M.; MATTILIO, C. M.; PISKORSKI, E. V. Rapid flood inundation mapping by differencing water indices from pre- and post-flood Landsat images. **Frontiers of Earth Science**, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11707-020-0818-0>

SOPKIN, K. L.; STOCKDON, H. F.; DORAN, B. K. S.; PLANT, N. G.; MORGAN, K. L. M.; GUY, K. K.; SMITH, K. E. L. Hurricane Sandy: observations and analysis of coastal change. **U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1088**, p. 54, 2014. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141088>