

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO NA ANÁLISE DA MORFODINÂMICA COSTEIRA DE DUNAS SUBMETIDAS A VENTOS ONSHORE: PRAIA DO PERÓ, RIO DE JANEIRO

Mota, B.A. (LAGEF - UFF) ; Coutinho, I.P. (LAGEF - UFF) ; Oliveira Filho, S.R. (LAGEF - UFF) ; Holanda, T.F. (LAGEF - UFF) ; Pereira, T.G. (GEOGRAFIA UERJ) ; Fernandez, G.B. (LAGEF - UFF)

RESUMO

Os processos físicos envolvendo praias e dunas frontais deixam registros morfológicos associados à ação eólica, assim como às ondas. Estas feições apresentam nuances fisiográficas de difícil documentação, pela escassez de dados analíticos. Na última década, houve uma sensível evolução de técnicas de documentação da morfologia de detalhe, utilizando algoritmos associados a Structure for Motion (SfM). Tais análises são possíveis a partir de imagens aéreas obtidas por veículos aéreos remotamente pilotados. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo mapear diferentes feições observadas em praias e dunas frontais, na praia do Peró, RJ. Os resultados identificaram cortes eólicos dispostos de maneira recurvada, provavelmente difratados por rugosidade no terreno. Em relação às ondas foi observada uma extensa escarpa erosiva, resultado de ondas de tempestade. Conclui-se que a ferramenta se mostra fundamental para que detalhes e nuances geomorfológicas possam ser descritas e analisadas.

PALAVRAS CHAVES

Dunas frontais; Cortes eólicos; Escarpas praias; Veículo aéreo não tipulado (ARP); Processos eólicos

ABSTRACT

The physical processes involving beaches and foredunes reveals morphological records associated with wind pattern and waves energy. These features present physiographic characteristics that are difficult to document, due to the scarcity of analytical data. In the last decades, there has been a significant evolution of detailed morphology based in innovative techniques, using algorithms associated with Structure for Motion (SfM). Such analyzes are possible from digital aerial images obtained by remotely piloted aerial vehicles. In this sense, this work aimed to map different features observed on beaches and foredunes, at Praia do Peró, RJ. The results identified recurved blowouts, probably diffracted by roughness present along the surface. In relation to the waves, an extensive erosive escarpment was observed, as a result of storm waves. We concluded that SFM is essential to determine geomorphological details and became an essential tool to analyzed beach and foredunes morphology.

INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo a geomorfologia eólica, abrangem diretamente áreas desérticas, mas também trechos litorâneos, que representam uma parcela importante na literatura científica geomorfológica (Bauer, 2009; Stout et al., 2009). De fato, para que sejam observadas feições derivadas da ação do vento, são necessárias condições físicas específicas ao longo do litoral interagindo de maneira consorciada. Tais condições derivam obviamente da ação dos ventos não somente com energia, mas constância, disponibilidade de sedimentos com características granulométricas que sejam passíveis de serem transportados, além de áreas relativamente amplas e planas, para que as formas eólicas se projetem desde o contato da praia com o oceano, até as áreas mais interiorizadas (e.g. Tsoar e Pye, 2009; Lancaster, 2013; Hesp, 2013; Walker et al., 2017; Sloss et al., 2018; Hesp e Walker, 2021). Desta forma, diferentes morfologias podem ser verificadas ao longo do litoral, muitas dessas formas relacionadas ao efeito direto à vegetação, como dunas frontais (Arens, 1996; Hesp, 2002) e dunas parabólicas (Tsoar e Blumberg, 2002; Hesp et al., 2010; Hart et al., 2012), além de nebkhas (El-Bana et al., 2002; Marrero-Rodríguez et al., 2020). Um desafio constante tem sido a interpretação morfológica da morfologia, haja visto que são necessários esforços significativos em termos financeiros, com equipamentos topográficos e de leitura à laser. Por outro lado, na última década o

desenvolvimento de fotogrametria de baixo custo, teve um impulso impressionante, em função do desenvolvimento de métodos para reconstrução topográfica de alta resolução, fortemente previsto e adequado para pesquisas de baixo orçamento e com aplicações em áreas remotas (Westoby et al., 2012). Tal fato ocorreu em ambientes computacionais, formulados em algoritmos que permitiram a geração de visualização tridimensional de determinados alvos, a partir de um arranjo de câmeras digitais, que podem ser bem-organizadas ou mesmo de forma randômica (Eltner e Sofia, 2020). Independente do arranjo fotográficos, algoritmos que permitem a criação de estruturas tridimensionais, reconhecida por *Structure from Motion* (SfM), favoreceram e tem sido amplamente utilizada para a documentação de formas de relevo observadas na superfície terrestre (Clapuyt et al., 2016; James et al., 2017). As geociências e particularmente a geomorfologia tem se dedicado a utilizar de maneira cada vez mais sistemática ferramentas de SfM, muito provavelmente em função dos custos relativamente baixos, uma vez que as fotografias aéreas são obtidas por aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), que tem se tornado acessíveis em termos de preço, comparados a alta efetividade dos resultados obtidos (Anderson et al., 2019). Particularmente nos estudos em ambientes costeiros, a utilização de SfM gerando representações tridimensionais de feições complexas como dunas e praias tem sido recorrente e intensificada (Turner et al., 2016), principalmente em monitoramentos costeiros (Gonçalves e Henriques, 2015). Parece claro que a utilização envolvendo imagens digitais obtidas por ARPs e pós processamento com técnicas SfM são um importante fronteira de conhecimento analítico na geomorfologia. No litoral do Rio de Janeiro, em que existem diferentes exemplos de ambientes deposicionais, se apresenta como uma área interessante de se verificar como que tais ferramentas podem auxiliar o entendimento de formas detalhadas de relevo. Nesse sentido, esse estudo tem como objetivo entender as formas de relevo distribuídas na planície costeira do Peró, no município de Cabo Frio-RJ, formadas pela ação dos ventos onshore, soprados preferencialmente de nordeste, assim como extrair informações sobre efeitos de ondas de tempestade, oriundas de ventos do quadrante sul, a partir de imagens digitais processadas por SfM.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a análise da ocorrência das diferentes feições geomorfológicas na planície costeira do Peró foram gerados modelos digitais de superfície (MDS), através de processamento por técnicas de SfM, a partir de fotografia aéreas digitais, obtidas no nadir, em duas áreas ao longo de determinados trechos planície costeira do Peró (Figura 1). As duas áreas dos voos foram delimitadas a partir do mapeamento geomorfológico das diferentes formas de relevo eólico, descrito em Fernandez et al. (2017). A distribuição dos voos foi determinada seguindo os objetivos de se cobrir diferentes padrões eólicos observados previamente na área, envolvendo formações relevantes descritas por dunas frontais posicionadas junto à costa e mais interiorizadas, definidas por formas parabólicas. Tais padrões foram reinterpretados sobre fotografias aéreas gratuitamente disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), realizadas em 2005, dentro do Projeto RJ25. A área do primeiro voo (voo 1) foi escolhida por representar não somente as dunas frontais, mas também por incorporar dunas posicionadas no reverso destas, em que foram mapeadas previamente dunas parabólicas (Fernandez et al. 2017; Fernandez et al. 2009). O voo 2 foi delimitado por representar formas de relevo proximal à costa, em que no mapeamento de Fernandez et al. (2017) e Fernandez et al. (2009) mostraram o desenvolvimento contínuo de dunas frontais, derivados de ventos de direção preferencial do oceano para o continente, em que não raramente ondas de tempestade afetam esta praia (Bulhões et al. 2016). Para a geração dos MDS foram necessários esforços de campo para a aquisição de fotografias aéreas digitais, registradas por câmeras aerotransportadas em Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). Os trechos da planície de sobrevoos foram sempre realizados em uma janela de tempo entre às 10:00hs e às 15:00hs, para se evitar problemas relacionados a geração de erros referentes a baixa luminosidade e sombras, não somente derivadas da vegetação, mas também da própria irregularidade topográfica das dunas. Os voos também foram realizados com predominância de céu aberto, que favoreceu a melhor definição das cores, além de obviamente em relação às condições de velocidade do vento. Em relação a esse último aspecto limitante, foi consultado o aplicativo UAV Forecast, que prevê velocidades de até 10 km/h seguras para voo, que de certa forma garante a qualidade das imagens por inibir distorções no processo de aquisição. As duas missões aéreas foram auxiliadas pelo aplicativo DroneDeploy, que permite definir

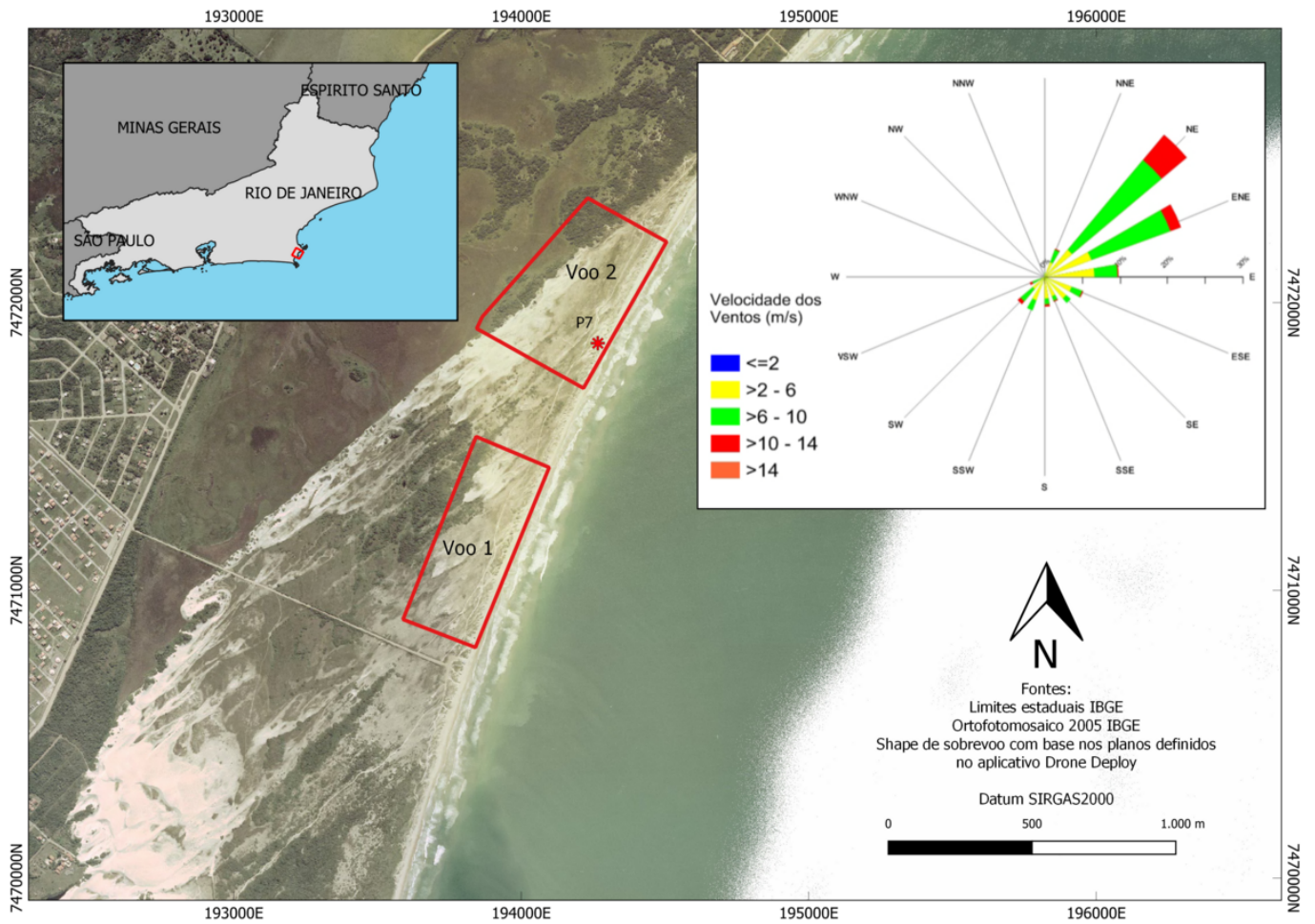
uma série de parâmetros de voo, como altitude, superposição entre as fotos, direção do voo e da distância da amostra no solo ou superfície (GSD a partir da tradução direta de Ground Sample Distance). As fotografias digitais foram armazenadas em cartão de memória embarcada na própria aeronave. Ainda em campo, para que os ajustes de topografia ortorretificados fossem posteriormente possíveis, foram adquiridos dados de posicionamento geográfico e altimetria. Este procedimento foi feito a partir de diferentes marcadores no terreno, distribuídos ao longo da área de sobrevoo. A altitude dos marcadores foi determinada por irradiação topográfica, utilizando estação total e prisma de reflexão, com as altitudes dispersadas a partir de referenciais de nível no terreno, com altitudes ajustadas ao nível médio do mar. A rotina de processamento computacional para a geração dos MDS após o trabalho de campo foi estabelecida nas plataformas AGISOFT Metashape e QGIS. No Agisoft as rotinas seguiram fluxos de trabalho padrão do programa, que permitiram a geração dos MDS. No QGIS, os dados morfológicos foram diretamente interpretados sobre o MDS, discretizando as diferentes formas de relevo observáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 estão apresentados os diferentes resultados obtidos no Voo1. A Figura 2A mostra a interpretação dos diferentes padrões eólicos, determinados sobre as fotografias aéreas obtidas em 2005. Nas fotografias aéreas a resolução espacial obtida, ou seja, o GSD foi de 1 metro/pixel. Na figura 2C mostra o MDS que permitiu a identificação de feições bastante mais detalhadas, em relação ao padrão observado em 2005, descritas na Figura 2B, descritas por GSD de 2,7 cm/pixel. Na Figura 2B, relativa ao ortofotomosaico gerado com as fotografias aéreas, estão as interpretações referentes aos diferentes depósitos eólicos feitas a partir do MDS. Em 2005 (Figura 2A) foram identificados os limites distais, associados ao reverso das dunas frontais, em relação à planície de deflação, além a identificação especificamente de um corte eólico, interrompendo a continuidade do alinhamento paralelo que estas dunas representam. O reverso das dunas frontais foi marcado por irregularidades na continuidade da linha de mapeamento, o que poderia indicar a ocorrência de outros cortes, porém em função da pouca evidência, não foram marcados no mapeamento. Na área da planície no reverso das frontais foram identificados três padrões de dunas parabólicas, com a feição mais ao norte apresentando um ou mais lóbulos de evolução, ajustados a ocorrência de ventos predominantes de nordeste. Nos lóbulos das dunas foram mapeados cortes eólicos. A partir dos MDS gerados na Figura 2C, houve uma sensível melhoria das formas de relevo previamente interpretados. Na Figura 2C de fato se notou que o reverso das dunas frontais apresentava uma linha irregular, com evidências dos sedimentos depositados nas dunas frontais, serem transgressivamente transportados por ventos de nordeste. Este movimento transgressivo parece estar ajustado a formação de cortes eólicos, cuja morfologia apresenta padrões recurvados. Em relação às dunas parabólicas foi possível um sensível detalhamento da ocorrência de dunas parabólicas não somente com diferentes lóbulos deposicionais, mas por detalhar diferentes cortes eólicos presentes nestas dunas. Em relação às escarpas erosivas que limitam a praia e as dunas frontais, os avanços foram mais tímidos, haja vista que na fotografia aérea de 2005, foi possível se determinar variações entre a vegetação e a berma, com o limite seco e úmido representado pelo espriamento das ondas. A formação de dunas frontais, na planície costeira do Perú foi primeiramente interpretada por Fernandez et al. (2009) que descreveu a acumulação contínua de sedimentos oriunda da remoção de materiais depositados na berma, removidos por ventos de nordeste, fixados por uma vegetação essencialmente reptante, dando origem às dunas frontais. Tais condições foram posteriormente detalhadas por Fernandez et al. (2017). O refinamento da morfologia de dunas frontais, porém com enfoque em arranjos na arquitetura deposicional foi feito por Moulton et al. (2013) ao analisar a morfoestratigrafia de diferentes dunas frontais no Rio de Janeiro e destaca o desenvolvimento de padrões de sedimentos depositados no topo das dunas do Perú, precipitados em direção ao continente, em função de ventos de nordeste. A ação das ondas de tempestade, causando efeitos morfológicos descritos por escarpas erosivas, deve-se a entrada de ondulações mais energéticas, do quadrante sul (Bulhões et al., 2016; Bulhões et al., 2014; Fernandez et al., 2011). Em relação às parabólicas, estas se mostram dispersas no reverso das dunas frontais (Fernandez et al., 2017; Fernandez et al. 2017). A morfologia das parabólicas segue um padrão de diferentes lóbulos deposicionais, que provavelmente refletem a dinâmica persistente de ventos unidirecionais, com pequenas flutuações, na evolução destes lóbulos, conforme Smyth et

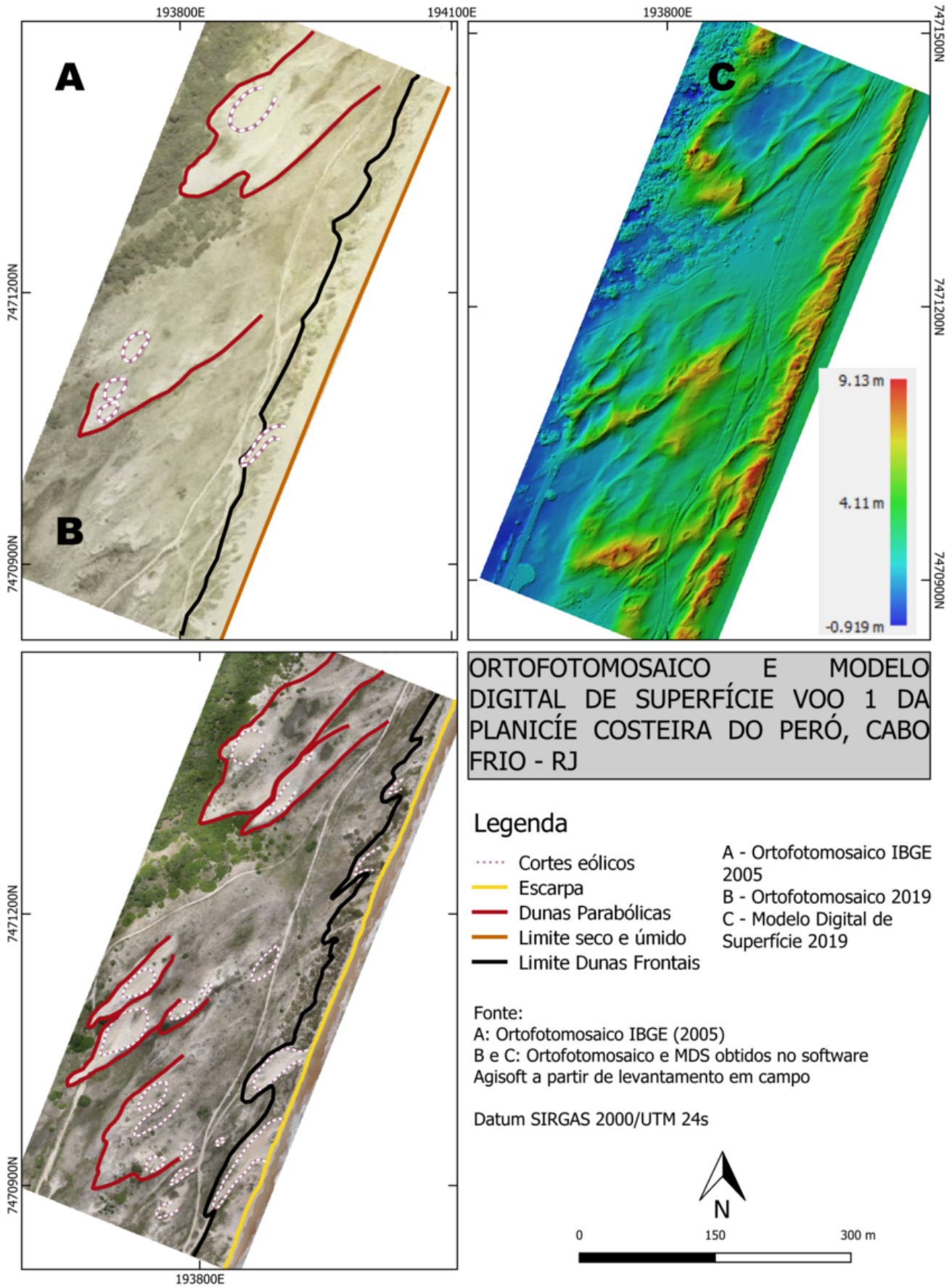
al. (2020). A provocação deste processo geomorfológico, provavelmente ocorre em função do desenvolvimento de cortes eólicos (Hesp, 2002), que em função de ventos descendentes em rajadas (Hesp & Hyde, 1996), favorecendo o aumento da área desprovida de vegetação, resultando em alargamento e aprofundamento conforme descrito por Smyth et al. (2012, 2019). Desta forma, variações na direção preferencial dos ventos de nordeste, sobre sedimentos previamente depositados na forma de parabólicas, favoreceriam a remoção da vegetação fixadora de dunas, definidos pelos cortes eólicos remodelando as dunas, em diferentes lóbulos direcionais. Desta maneira, é bastante provável que as dunas parabólicas na área do Perú, por não estarem conectadas diretamente às dunas frontais (Muehe, 2017; Fernandez et al, 2017; Fernandez et al. 2009), devam ser o registro de dunas distribuídas na planície costeira, formadas em condições ambientais pretéritas, ou seja, é provável que tais dunas sejam resultado do efeito da vegetação, que favoreceu a formação das parabólicas. Outra possibilidade seria o desenvolvimento transgressivo de dunas frontais, que poderia ser desestabilizado por cortes eólicos, favorecendo a migração para o interior de sedimentos parcialmente expostos nos cortes eólicos nas frontais. De fato, com a proximidade das dunas frontais, a partir de cortes eólicos, com as pernas das parabólicas mais proximais à costa, talvez sejam em parte o reflexo da conexão futura entre as dunas posicionadas frontalmente ao oceano, com a pernas mais proximais ao litoral. Estudos desta natureza envolveriam desde a escala de eventos para mesoescala (Delgado-Fernandez et al., 2018). De toda a forma, seriam necessários esforços de monitoramento em sequência da dinâmica destas dunas, além de amostras para obtenção de dados geocronológicos, para se estudar evolução de mais longo prazo, não previstos neste trabalho. Lembrando que infelizmente fotografias aéreas mais antigas do que 2005, pela baixa resolução espacial, não se mostraram confiáveis para o melhor entendimento da evolução históricas das dunas mais interiorizadas. Na área do segundo voo, o trecho analisado mostra o desenvolvimento de cortes eólicos diretamente sobre as dunas frontais. Os padrões morfológicos recurvados dos cortes sugerem a deflexão dos ventos, a partir de cortes eólicos. Padrões defletidos, como os observados no Perú, devem estar relacionados a padrões semicirculares observados por Smyth et al. (2013). Formas semicirculares também foram descritas no Canadá por Hesp & Walker (2012) que mostram a evolução sistemática dos cortes, em função de circulação interna, determinada pelo aprofundamento topográfico. Dados apresentados nos Estados Unidos reforçam esta dinâmica (Abhar et al., 2015). Especificamente no Perú, Muehe et al. (2017) documenta o aprofundamento de um corte eólico, que representa o entendimento em termos de dinâmica, dos cortes eólicos. Na fotografia aérea de 2005 não era possível a identificação de um corte eólico, uma vez que Muehe et al. (2010), se propôs a analisar possíveis conexões entre a praia e dunas frontais, assim como a transferência de sedimentos para a planície. Num segundo trabalho, porém, este corte eólico é muito bem documentado em Muehe et al. (2015), a partir de sequências de perfis de praia, em que se evidencia gradualmente durante o monitoramento, do aprofundamento da morfologia, descrito por um corte transversal a essa feição. A partir dos dados de MDS, também se nota o desenvolvimento de formas parabólicas, a partir de lóbulos evolutivos, no reverso das dunas frontais. Tal fato é interessante, pois parece que a partir das dunas de precipitação observadas em Moulton et al. (2013), estas feições poderiam evoluir para o interior, com pouco aporte sedimentar oriundo das dunas frontais. Hugenholtz (2010) descreve que é possível se identificar dunas parabólicas com baixo suprimento sedimentar, ou seja, mesmo com a acumulação nas dunas frontais, cortes eólicos atuais ou parcialmente estabilizados no Perú, poderiam ser interpretados com dados de alta resolução, para melhor detalhamento morfológico.

Figura 1



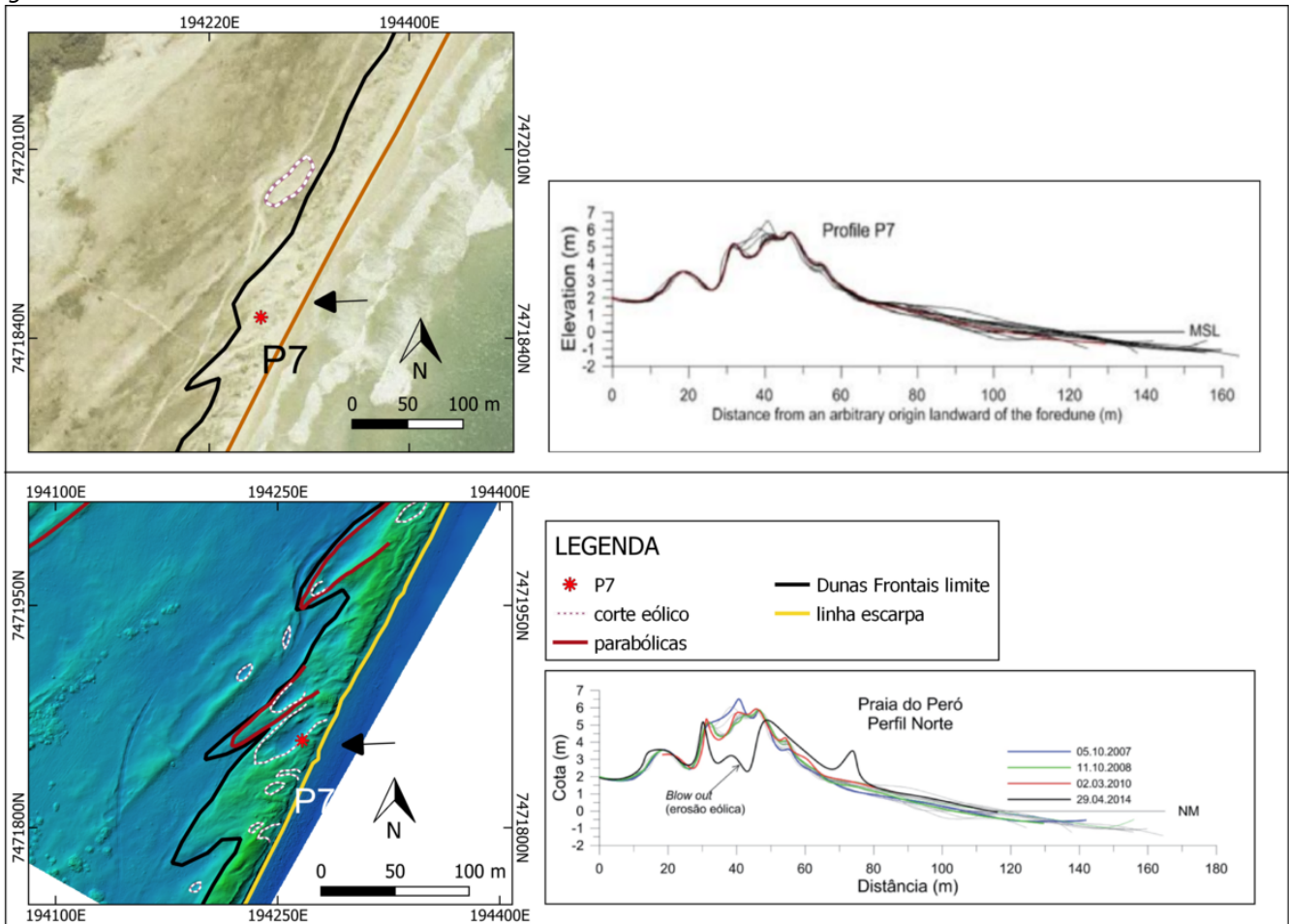
Distribuição das duas áreas de sobrevoo com ARP na planície costeira do Perú

Figura 2



Morfologia das dunas costeiras observadas no Perú no sobrevoo 1. Notar a junção entre as frontais e parabólicas mais distais à praia.

Figura 3



Dunas frontais, cortes eólicos e escarpas distribuídos no Perú. As comparações com dados de Muehe (2014) evidenciam a atual dinâmica destas dunas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A planície costeira do Perú, mesmo com um bom histórico de trabalhos sobre sua geomorfologia, apresenta lacunas importante para o melhor entendimento sobre nuances morfológicas envolvendo processos aerodinâmicos e hidrodinâmicos. Desta forma, a partir do detalhamento morfológico, envolvendo não somente resultados sobre a relação morfodinâmica envolvendo as praias e as dunas frontais, assim como também na distribuição de formas das dunas distribuídas ao longo da planície, foram feitos avanços sobre tais nuances, possíveis apenas pela popularização na aquisição de dados aerofotogramétricos com ARPs, e processamento destes dados, para a geração de MDS, em ambiente computacional. Particularmente em áreas costeiras, em que a cobertura vegetal, em determinadas áreas é rarefeita, estas ferramentas tendem a assumir um papel cada vez mais relevante, em função da excelente resolução espacial dos MDS. Especificamente a determinação de formas associadas a ação de ondas, como a continuidade de escarpas erosivas contínuas às praias, assim como a identificação de diferentes tipologias de cortes eólicos, foram potencialmente demonstrados no Perú. Mesmo feições mais interiorizadas, em que seriam talvez mascaradas pela vegetação, como no caso das parabólicas, estas também tiveram uma boa documentação, em função da resolução espacial. Desafios em relação a estudos comparativos, monitoramento e

conexão com alterações e dinâmica em mesoescala estão postas como elementos de futuros trabalhos.

AGRADECIMENTOS

BMota agradece à Capes pela bolsa de mestrado (2021-2023). SOLiverira Filho foi bolsista PNPd - CAPES. THolanda agradece à CAPES pela bolsa de doutorado. GFernandez agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa (PQ)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Abhar, K. C., Walker, I. J., Hesp, P. A., & Gares, P. A. (2015). Spatial-temporal evolution of aeolian blowout dunes at Cape Cod. *Geomorphology*, 236, 148-162. <https://doi.org/10.1016/j.GEOMORPH.2015.02.015>
- Anderson, K., Westoby, M.J., James, M.R., 2019. Low-budget topographic surveying comes of age: Structure from motion photogrammetry in geography and the geosciences. *Progress in Physical Geography* 43, 163-173. <https://doi.org/10.1177/0309133319837454>
- Arens, S.M., 1996. Patterns of sand transport on vegetated foredunes. *Geomorphology* 17, 339-350. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(96\)00016-5](https://doi.org/10.1016/0169-555X(96)00016-5)
- Bauer, B.O., 2009. Contemporary research in aeolian geomorphology. *Geomorphology* 105, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.014>
- Bulhões, E. M. R., Fernandez, G. B., Oliveira Filho, S. R. de, Pereira, T. G., & Rocha, T. B. da. (2014). Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 5(2), 155-165. <https://doi.org/10.5380/abequa.v5i2.36460>
- Bulhões, E., Guilherme, G. B. F., Filho, S. R. O., & Pereira, T. G. (2016). Coastal impacts induced by storm waves between Cape Frio and Cape Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 1(75), 1047-1051. <https://doi.org/10.2112/SI75-210.1>
- Clapuyt, F., Vanacker, V., van Oost, K., 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology* 260, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.GEOMORPH.2015.05.011>
- Delgado-Fernandez, I., Smyth, T. A. G., Jackson, D. W. T., Smith, A. B., & Davidson-Arnott, R. G. D. (2018). Event-Scale Dynamics of a Parabolic Dune and Its Relevance for Mesoscale Evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(11), 3084-3100. <https://doi.org/10.1029/2017JF004370>
- El-Bana, M.I., Nijs, I., Kockelbergh, F., 2002. Microenvironmental and vegetational heterogeneity induced by phytogenic nebkhas in an arid coastal ecosystem. *Plant and Soil* 247, 283-293. <https://doi.org/10.1023/A:1021548711206>
- Eltner, A., Sofia, G., 2020. Structure from motion photogrammetric technique. *Developments in Earth Surface Processes* 23, 1-24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>
- Fernandez, G. B., Bulhoes, E., & Da Rocha, T. B. (2011). Impacts of severe storm occurred in April 2010 along Rio de Janeiro Coast, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SPEC. ISSUE 64.
- Fernandez, G. B., Pereira, T. G., & Da Rocha, T. B. (2009). Coastal dunes along Rio de Janeiro coast: Evolution and management. *Journal of Coastal Research*, SPEC. ISSUE 56.
- Fernandez, G.B., Pereira, T.G., Rocha, T.B., Maluf, V., Moulton, M., Oliveira Filho, S.R. de, 2017. Classificação Morfológica Das Dunas Costeiras Entre O Cabo Frio E O Cabo Búzios, litoralDo Estado Do Rio De Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 18. <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i3.862>
- Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.ISPRSJPRS.2015.02.009>
- Hart, A.T., Hilton, M.J., Wakes, S.J., Dickinson, K.J.M., 2012. The impact of *Ammophila arenaria* foredune development on downwind aerodynamics and parabolic dune development. *Journal of Coastal Research* 28, 112-122. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00058.1>
- Hesp, P. (2002). Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48(1-3), 245-268. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8)
- Hesp, P. A. (2013). Conceptual models of the evolution of transgressive dune field systems. *Geomorphology*, 199, 138-149.

- Hesp, P. A., & Hyde, R. (1996). Flow dynamics and geomorphology of a trough blowout. *Sedimentology*, 43(3), 505–525. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1996.D01-22.X>
- Hesp, P. A., & Walker, I. J. (2012). Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Aeolian Research*, 3(4), 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.09.002>
- Hesp, P., Schmutz, P., Martinez, M.L.M., Driskell, L., Orgera, R., Renken, K., Revelo, N.A.R., Orcio, O.A.J., 2010. The effect on coastal vegetation of trampling on a parabolic dune. *Aeolian Research* 2, 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2010.03.001>
- HESP, P.A. and WALKER, I.J., 2021. Coastal Dunes V2. *Treatise on Geomorphology*, 2nd edition. Elsevier. *Treatise on Geomorphology* 2nd Edn.
- Hugenholtz, C. H. (2010). Topographic changes of a supply-limited inland parabolic sand dune during the incipient phase of stabilization. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(14), 1674–1681. <https://doi.org/10.1002/ESP.2053>
- James, M.R., Robson, S., d’Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology* 280, 51–66.
- Lancaster, N., 2013. 11.1 Aeolian Geomorphology: Introduction.
- Marrero-Rodríguez, N., García-Romero, L., Peña-Alonso, C., Hernández-Cordero, A.I., 2020. Biogeomorphological responses of nebkhas to historical long-term land uses in an arid coastal aeolian sedimentary system. *Geomorphology* 368.
- Moulton, M., Filho, S. O., Rocha, T. B., & Fernandez, G. B. (2013). Foredunes of rio de janeiro coast: Genesis, structure and morphology. *Journal of Coastal Research*, SPEC. ISSUE 65. <https://doi.org/10.2112/SI65-223>
- Moulton, M., Filho, S.O., Rocha, T.B., Fernandez, G.B., 2013. Foredunes of rio de janeiro coast: Genesis, structure and morphology. *Journal of Coastal Research*. <https://doi.org/10.2112/SI65-223>
- Muehe, D.; Lins-de-Barros, F., Oliveira, J. F., ; Klumb-Oliverira, L. (2015). Pulsos erosivos e resposta morfodinâmica associada a eventos extremos na costa leste do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 16(3).
- MUEHE, D.; Belligotti, F.M.; Lins-de-Barros, F.M.; Oliveira, J.F.; Maia, L.F.P.G. Potential vulnerability to climate change of the beach-dune system o the Perú coastal plain - Cabo Frio, Rio de Janeiro state, Brazil. 2010.
- Pye, K., Tsoar, H., Pye, K., & Tsoar, H. (2009). Characteristics of windblown sediments. *Aeolian Sand and Sand Dunes*, 51–97.
- Sloss, B.C.R., Shepherd, M., Hesp, P., Education, N., Sloss, C., Dunes, P.C., 2018. Coastal Dunes: *Geomorphology* 3, 1–11.
- Smyth, T. A. G., Delgado-Fernandez, I., Jackson, D. W. T., Yurk, B., & Rooney, P. (2020). Greedy parabolics: Wind flow direction within the deflation basin of parabolic dunes is governed by deflation basin width and depth. *Progress in Physical Geography*, 44(5), 643–660. <https://doi.org/10.1177/0309133319899306>
- Smyth, T. A. G., Hesp, P. A., Walker, I. J., Waskiewicz, T., Gares, P. A., & Smith, A. B. (2019). Topographic change and numerically modelled near surface wind flow in a bowl blowout. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(10), 1988–1999. <https://doi.org/10.1002/ESP.4625>
- Smyth, T. A. G., Jackson, D. W. T., & Cooper, J. A. G. (2012). High resolution measured and modelled three-dimensional airflow over a coastal bowl blowout. *Geomorphology*, 177–178, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.GEOMORPH.2012.07.014>
- Smyth, T. A. G., Jackson, D. W. T., & Cooper, J. A. G. (2013). Three dimensional airflow patterns within a coastal trough-bowl blowout during fresh breeze to hurricane force winds. *Aeolian Research*, 9, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.AEOLIA.2013.03.00>
- Stout, J.E., Warren, A., Gill, T.E., 2009. Publication trends in aeolian research: An analysis of the Bibliography of Aeolian Research. *Geomorphology* 105, 6–17. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.015>
- Tsoar, H., Blumberg, D.G., 2002. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel’s Mediterranean coast. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 1147–1161. <https://doi.org/10.1002/ESP.417>
- Turner, I.L., Harley, M.D., Drummond, C.D., 2016. UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*

114, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.COASTALENG.2016.03.011>

Walker, I.J., Davidson-Arnott, R.G.D., Bauer, B.O., Hesp, P.A., Delgado-Fernandez, I., Ollerhead, J., Smyth, T.A.G., 2017. Scale-dependent perspectives on the geomorphology and evolution of beach-dune systems. *Earth-Science Reviews* 171, 220–253. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.011>

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.GEOMORPH.2012.08.021>