

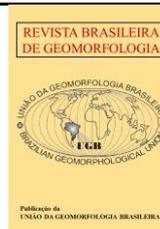


<http://lsie.unb.br/ugb/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 22, n° 4 (2021)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i4.2041>



Artigo de Pesquisa

# Dinâmica das Dunas Escalonares Transgressivas Sobre a Região do Perú - Cabo Frio, Rio de Janeiro

## *Dynamics of Transgressive Climbing Dunes Over Perú District - Cabo Frio, Rio de Janeiro State*

Ingrid Rayanne Lima da Silveira <sup>1</sup>, Daniel Fernandes <sup>2</sup>, Caíque Lima Cabral <sup>3</sup>, Diego Martins Vellasquez de Oliveira <sup>4</sup>, Willian Cruz Gouvea Junior <sup>5</sup> e João Wagner de Alencar Castro <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Quinta da Boa Vista, s/n, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 20940-040. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6225-344X>  
E-mail: [silveira.ingrid.90@gmail.com](mailto:silveira.ingrid.90@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Geologia  
Quinta da Boa Vista, s/n, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 20940-040. Brasil  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4218-8198>  
E-mail: [fernandes.geol@gmail.com](mailto:fernandes.geol@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Geologia  
Av. Athos da Silveira Ramos 274, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 21941-916. Brasil.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5187-7086>  
E-mails: [cabral@mn.ufrj.br](mailto:cabral@mn.ufrj.br)

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia,  
Av. Athos da Silveira Ramos 274, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 21941-916. Brasil.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0332-8728>  
E-mail: [diego.vellasquez@gmail.com](mailto:diego.vellasquez@gmail.com)

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia,  
Av. Athos da Silveira Ramos 274, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 21941-916. Brasil.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-2291>  
E-mail: [williangouveajr@gmail.com](mailto:williangouveajr@gmail.com)

<sup>6</sup> Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Quinta da Boa Vista, s/n, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 20940-040. Brasil  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8955-5971>  
E-mail: [jwacastro@gmail.com](mailto:jwacastro@gmail.com)

Recebido: 07/10/2020; Aceito: 22/06/2021; Publicado: 01/10/2021

**Resumo:** O campo de dunas escalonares “*climbing dunes*” do Perú, Cabo Frio – Estado do Rio de Janeiro, caracteriza-se por feições longitudinais, barcanas e barcanóides que se projetam sobre áreas urbanas, frentes montanhosas e vegetação litorânea da Área de Proteção Ambiental do Pau-Brasil. Objetiva-se estudar o processo de soterramento decorrente da movimentação de dunas neste segmento de litoral semiárido do Estado do Rio de Janeiro. Os procedimentos adotados envolveram técnicas de sensoriamento remoto, análise de dados

pluviométricos e regime de ventos. Através do *software* ArgGIS Pro, versão 2.6, foram definidas três seções transversais, correspondentes às frentes de projeções de dunas escalonares mais expressivas. Desenvolveu-se análise do comportamento espaço-temporal entre 1990 a 2020. A trajetória dos ventos foi obtida pelo *software* HYSPLIT - *Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (versão online), desenvolvido pela NOAA e pelo *Bureau of Meteorology* da Austrália. Foram geradas 12 trajetórias de frequências, tipo “forward”, sendo uma para cada mês de 2019. Resultados sugerem que o regime de ventos apresenta distribuição homogênea ao longo da série temporal analisada entre 2007 a 2019. As variações mais frequentes encontram-se nos quadrantes NE-SSE, e as menos frequentes no quadrante W-SW. Em relação a taxa de soterramento das áreas de retaguarda, a movimentação do campo de dunas não é uniforme. Na lagoa Brejo do Matadouro a movimentação média foi de 4,7 m/ano e, nas proximidades das frentes montanhosas cobertas por vegetação, foi de 0,5 m/ano. O conhecimento dos processos envolvidos na movimentação de dunas móveis e no soterramento de áreas urbanas é um aspecto relevante na elaboração planos diretores e gestão das zonas costeiras e um estudo indispensável para implementação de medidas mitigadoras.

**Palavras-chave:** Transporte de Sedimentos Eólicos; Dunas Móveis Transgressivas; Soterramento da Planície Costeira; Sensoriamento Remoto.

**Abstract:** The climbing dunes field in Peró District, Cabo Frio - State of Rio de Janeiro, is characterized by longitudinal, barchan and barchanoid features that protrude over urban areas, mountain fronts and coastal vegetation of Pau-Brazil Environmental Protection Area. The objective is to study the burial process resulting from the dunes movement in this semiarid coast segment of Rio de Janeiro State. The applied procedures involved remote sensing techniques, pluviometric data analysis and wind regime. By using the ArgGIS Pro software, version 2.6, three cross sections were defined, corresponding to the most significant fronts of climbing dunes protrudes. An analysis of the spatio-temporal behavior between 1990 and 2020 was carried out. The wind trajectory was obtained by the software HYSPLIT - Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (online version), developed by NOAA and by the Australian Bureau of Meteorology. Twelve frequency trajectories, type “forward”, were generated, thus one for each month of 2019. The results suggest that the wind regime has a homogeneous distribution throughout the analyzed temporal series between 2007 and 2019. The most frequent variations are found in the quadrants NE-SSE, and the least frequent ones in the W-SW quadrant. Regarding the burial rate of the rear areas, the dune field movement is not uniform. The average movement in Brejo do Matadouro lagoon was 4.7 m per year, and in the vicinity of the mountainous fronts covered by vegetation the average was 0.5 m per year. The knowledge of the processes that are involved in mobile dunes movement and in the burial of urban areas is a relevant aspect for master plans elaboration and the coastal areas management, as well as an indispensable study for mitigating measures implementation.

**Keywords:** *Aeolian Sediment Transport, Transgressive Mobile Dunes, Burial of Coastal Plain, Remote sensing.*

---

## 1. Introdução

Bagnold (1933) define uma duna como uma acumulação de areia móvel cuja ocorrência é independente, tanto da forma do terreno como de obstáculos fixos. Os grupos de dunas são denominados como complexos de depósitos eólicos. Bagnold (1941) estaca o papel do movimento de sedimentos em três situações: rastejamento superficial, saltação e suspensão. A subida inicial do grão após o impacto é praticamente vertical, mas a parte final da trajetória é longa e plana, fazendo um ângulo com a superfície entre 3° e 10°. Segundo Goldsmith (1978), a presença de dunas costeiras é determinada pela relação de três variáveis: a disponibilidade de sedimento solto; a atuação do vento de suficiente intensidade e direção para remobilizar o sedimento e transportá-lo; e a existência de uma superfície de dimensões adequadas para que o ambiente eólico se desenvolva.

Conforme trabalhos desenvolvidos por Bagnold (1941), Lettau e Lettau (1978), Nickling (1986), Sherman e Hotta (1990), Castro (2005), Hesp (2013), Miguel e Castro (2018), os processos físicos de sedimentação eólica, associados ao desenvolvimento de dunas costeiras podem ser aferidos através de estimativas de taxas de transporte induzidas pelo vento. Em relação às estimativas de transporte eólico e balanço sedimentar, Werner, Ilenberguer e Rust (1988) realizam os primeiros trabalhos em dunas na região de Alexandria, costa da África do Sul. As movimentações de dunas transversais foram obtidas através da análise aerofotogramétricas de diferentes datas de

voos e pela expressão desenvolvida por Simons, Richardson e Nordin Junior (1965) para o cálculo de estimativa de taxas de transporte eólico em diversos pontos do campo de dunas estudado. Castro (2005) aplicou metodologia semelhante nos campos de dunas do litoral setentrional do Nordeste brasileiro.

Segundo Castro et al. (2017) e Miguel e Castro (2018), a origem e evolução dos depósitos eólicos costeiros no litoral brasileiro e na África Austral é determinada pelas variações do relativo nível do mar durante o Holoceno, regime de ventos com velocidades superiores a 6,0 m/s, suprimento de sedimentos, baixos índices pluviométricos e espaço apropriado para acumulação. Castro (2006) sugere que a evolução morfológica das dunas da região do Perú - Cabo Frio na costa semiárida do Estado do Rio de Janeiro, deve-se a uma sucessão de eventos geológicos ocorridos após o optimum climático holocênico (6.335 - 4.800 cal anos AP, conforme Cunha et al., 2017), entre estes, o rebaixamento do nível relativo do mar e o estabelecimento da ressurgência costeira na região. O rebaixamento do NRM propiciou o desenvolvimento de ampla planície costeira bordejada por maciços costeiros (RANGEL, 2005; CABRAL; CASTRO; CUNHA, 2018). À medida que a planície costeira se expandia, foi gerado novo espaço para deposição de sedimentos eólicos, formando assim, dunas costeiras submetidas a regime de vento unimodal provenientes do quadrante nordeste (CASTRO; ANTONELLO; GONÇALVES, 2003).

A formação de depósitos eólicos costeiros depende da zona de alimentação do sistema (praia). Os sedimentos são retrabalhados e colocados em suspensão em direção à zona de trânsito, constituída pela planície de deflação e, em seguida, depositados originando as feições eólicas (FRYBERGUER, 1979; CASTRO, 2001; CASTRO et al., 2017; MIGUEL; CASTRO, 2018). A disponibilidade de sedimentos no litoral, por sua vez, depende do aporte de sedimentos fluviais, de depósitos arenosos na plataforma continental interna e do transporte de sedimentos induzidos por ondas e ventos (CASTRO, 2001). O campo de dunas do Perú, caracteriza-se por formas escalonares "climbing dunes" (CASTRO; ANTONELLO; GONÇALVES, 2003). São formas de leito geradas através de vento unidirecional sobre superfícies com inclinações superiores a 10° (PYE; TSOAR, 1990). A ocorrência de fluxo de vento constante, presença de fonte alimentadora e o baixo índice pluviométrico local, favorecem o processo deposicional (CASTRO; ANTONELLO; GONÇALVES, 2003).

O campo de dunas escalonares transgressivas da região do Perú, apresenta um conjunto de formas e feições eólicas com morfologias variadas, com extensão de 7,0 km<sup>2</sup>. É limitado a leste pela praia do Perú e a oeste por uma extensa área composta por brejos e lagoas e pela Estrada do Guriri (CASTRO; ÁVILA; GONÇALVES, 2002). O regime de ventos predominante é de nordeste com velocidades acima de 6,0 m/s. A incidência de ventos constante sobre a zona de alimentação do sistema eólico (praia) forma um ângulo de 20°, resultando no desenvolvimento de dunas escalonares transgressivas (CASTRO; ANTONELLO; GONÇALVES, 2003). Através de ferramentas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem numérica, o presente trabalho objetiva quantificar a taxa de movimentação de dunas sobre recursos hídricos, áreas urbanas e vegetação da Área de Proteção Ambiental do Pau-Brasil nesse segmento de litoral, possibilitando definir zonas de interdição submetidas a soterramentos.

## 2. Condicionantes Ambientais

A área investigada localiza-se entre o cabo Búzios e o cabo Frio - Região do Lagos Fluminenses, Estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil (Figura 1). Nessa região ocorrem dois domínios geológicos distintos: o embasamento cristalino e os depósitos sedimentares fluviais e costeiros. O embasamento é caracterizado por promontórios constituídos por ortognaisses félsicos, ortoanfíbolitos, metassedimentos intercalados e granitos. Os depósitos sedimentares são compostos por sedimentos de ambientes continentais (Formação Barreiras) e costeiros, constituídos por praias, cordões litorâneos, dunas, lagoas e pântanos (CASTRO, 2018). Do ponto de vista geomorfológico, o campo de dunas investigado caracteriza-se pelas seguintes feições, conforme classificação proposta por Castro (2001): 1) Dunas Longitudinais frontais e de retaguarda; 2) Dunas Oblíquas (*climbing dunes*); 3) Planície de Deflação. Estes agrupamentos são compartimentados em formas distintas, tipo: 1.1) longitudinais e *coppice*; 2.1) barcanas e barcanóides; 3.1) lençóis mantiformes.

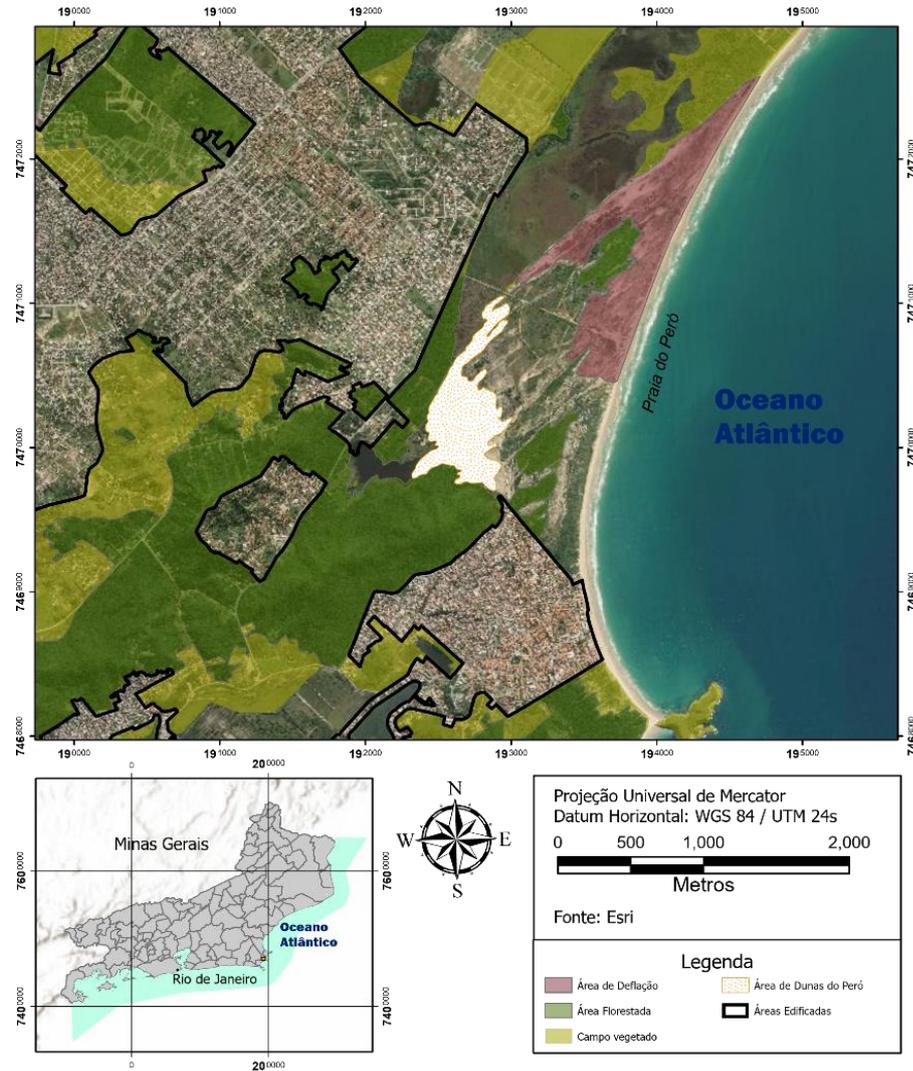
As dunas costeiras da região de Cabo Frio constituem o mais importante registro eólico ativo do sudeste brasileiro, no que diz respeito ao volume de sedimentos e diversidade de feições e formas (CASTRO; ANTONELLO; GONÇALVES, 2003). A construção das formas de leito desses depósitos eólicos é produto da velocidade média dos ventos de nordeste e ocorrência de vegetação no segmento de pós-praia. Os maciços costeiros localizados a sudeste da área de estudo exercem um forte controle morfológico sobre a dinâmica eólica local. Esse segmento da costa semiárida do Estado do Rio de Janeiro, caracteriza-se pela ausência de desembocaduras fluviais. O canal de

Itajuru da laguna de Araruama é a única via de troca de água entre o oceano e o continente (SILVA, 2009). A região do entorno caracteriza-se por cristas de praia, terraços marinhos, dunas costeiras e arcos de praia arenosos segmentados por promontórios rochosos (RIBEIRO, 2001). Nesse contexto insere-se o arco praiado da região do Peró com extensão de aproximadamente 6,0 km e orientação NE-SW.

Trabalhos desenvolvidos sobre as oscilações do nível relativo do mar durante o Holoceno identificaram antigas posições de linha de praia, referentes à última transgressão holocênica ocorrida nesse segmento de litoral Brasileiro (MARTIN et al., 1996; CASTRO et al., 2014). O pico dessa transgressão ocorreu há aproximadamente entre 6.335 a 4.800 anos cal AP (CUNHA et al., 2017). O paleonível do mar foi de 3,0 m acima do atual, resultando na formação de uma grande paleolaguna. Sistemas de ilhas-barreira e cristas de praia foram formados à medida que o nível relativo do mar foi rebaixando (CASTRO et al., 2014). À medida que o nível do mar recuava, a planície costeira foi se estabelecendo, favorecendo assim a formação de dunas (CASTRO et al., 2014; CASTRO et al., 2018). A ocorrência de dunas escalonares nessa região associa-se ao regime de vento unimodal de nordeste e as frentes montanhosas de retaguarda que impedem a projeção desses depósitos eólicos (CASTRO, 2006).

A plataforma continental interna entre Macaé e Cabo Frio é recoberta por areias médias a finas e por uma delgada camada de lama próxima a isóbata de 20 m (MUEHE; VALENTINI, 1998; MUEHE et al., 2006). O clima de ondas da região é predominantemente do quadrante nordeste e secundariamente de sudeste e sudoeste. A ocorrência de ondas do anticiclone no Oceano Atlântico Sul está associada às frentes frias polares de leste-sudeste (CASTRO, 2018). A área de estudo é submetida a regime de micro maré com preamar de 1,0 m e baixa-mar entre 0,06 e 0,025 m, referindo-se à redução da maré de 0,67 m, conforme Marinha do Brasil (SILVA, 2009). A região é fortemente influenciada pela ressurgência costeira, impulsionada pelos ventos de nordeste, trazendo à superfície, águas frias e ricas em nutrientes (AREIAS et al., 2020). Quando os ventos de nordeste persistem por vários dias, ocorre uma forte ressurgência, diminuindo a temperatura da superfície do mar em até 15° C (VALENTIN, 1984; FONSECA, 2012).

Algumas anomalias da superfície do mar, causadas por temperaturas mais baixas decorrentes da ressurgência costeira, estão presentes na plataforma continental, especialmente durante o verão (GYLLENCREUTZ et al., 2010). O clima local caracteriza-se como semiárido, com baixos índices pluviométricos (entre 750 a 855 mm/ano) e taxas de evaporação elevadas (entre 1.200 a 1.400 mm/ano) (BARBIERI, 1984). A circulação atmosférica é resultado da ação do sistema ASAS (anticiclone subtropical Atlântico Sul), responsável pela geração de ventos de nordeste durante maior parte do ano e entradas de sistemas frontais durante meses de inverno (REBOITA; AMBRIZZI; ROCHA, 2009). Dados coletados em escala anual pela estação meteorológica mantida pela Companhia de Álcis do Brasil, no município de Arraial do Cabo, apontam que a frequência dos ventos de nordeste na região está na ordem de 40% (RANGEL, 2005).



**Figura 1.** Localização da área de estudo na região do Peró - Cabo Frio, no contexto do Estado do Rio de Janeiro. Delimitação de áreas de uso e ocupação do solo no entorno do campo de dunas escalonares “Climbing dunes”.

### 3. Materiais e Métodos

Os procedimentos metodológicos consistem no uso de geotecnologias consolidadas na elaboração e desenvolvimento de pesquisas na área de geociências. Através de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento foram analisados cinco cenários paisagísticos no intervalo compreendido entre 1990 a 2020. Através do site do USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) foram obtidas quatro imagens multiespectrais com resolução espacial de 30 m do satélite LandSat 5 e 8 e duas imagens referentes a bandas pancromáticas com resolução de 15 m, referente ao satélite LandSat 8. Utilizou-se também uma imagem dos satélites RapidEye com resolução de 5,0 m, obtida junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

#### 3.1. Geoprocessamento

As imagens orbitais foram obtidas inicialmente no referencial dos sensores, sendo posteriormente georreferenciadas pelo método de interpolação baseado no vizinho mais próximo. Através do software ArcGis Pro, versão 2.6, as imagens foram importadas, considerando a projeção UTM zona 24S e o referencial WGS 84. Durante a etapa de Processamento Digital de Imagens (PDI) realizou-se as composições em falsa cor das bandas espectrais R(5)G(3)B(1) para imagem RapidEye, destacando a vegetação do entorno do campo de dunas escalonares “climbing dunes” da região do Peró. O mesmo procedimento foi realizado para imagens LandSat 5 e LandSat 8 com composições R(4)G(3)B(2) e R(5)B(4)B(2), respectivamente. Ainda na etapa de PDI, foi realizada a fusão em dois

conjuntos de imagens obtidas do satélite LandSat 8. A primeira, refere-se a imagens obtidas em 20/09/2016 e a segunda obtida em 30/08/2020. O objetivo deste procedimento foi colorir uma faixa pancromática de melhor resolução com base em uma faixa multiespectral de menor resolução, utilizando a ferramenta *Pansharpening do ArcGis Pro*. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros referentes as imagens utilizadas nesse processo.

Satélites / Sensores	Resolução Espacial	Resolução Espectral	Resolução Radiométrica	Data de aquisição	Composição de Bandas
LandSat-5/ TM	30 m	7 Bandas	8 bits	05/03/1990 24/09/2000	R(4)G(3)B(2)
LandSat - 8/ OLI-TIRS	15-30 m	11 Bandas	16 bits	20/09/2016 30/08/2020	R(5)B(4)B(2) + Fusionamento com banda 8
RapidEye	5 m	5 Bandas	12 Bits	10/01/2014	R(5)G(3)B(1)

**Tabela 1.** Dados referentes aos parâmetros de resolução e composição de bandas para imagens do campo de dunas do Perú.

Após o processamento digital de imagens, foi realizada a delimitação das áreas de uso e ocupações de solo e identificação do posicionamento das frentes de dunas entre os anos de 1990 e 2020. O mapeamento foi definido na escala 1:15.000, considerando as imagens OLI com pixel de 15 m, após fusionamento entre bandas coloridas multiespectrais com banda pancromática 8 do satélite LandSat 8. Para o cálculo das taxas de movimentação de dunas, em m / ano, foram selecionadas três frentes de dunas obliquas à linha de costa, denominadas de "A", "B" e "C".

### 3.2. Sumário Meteorológico

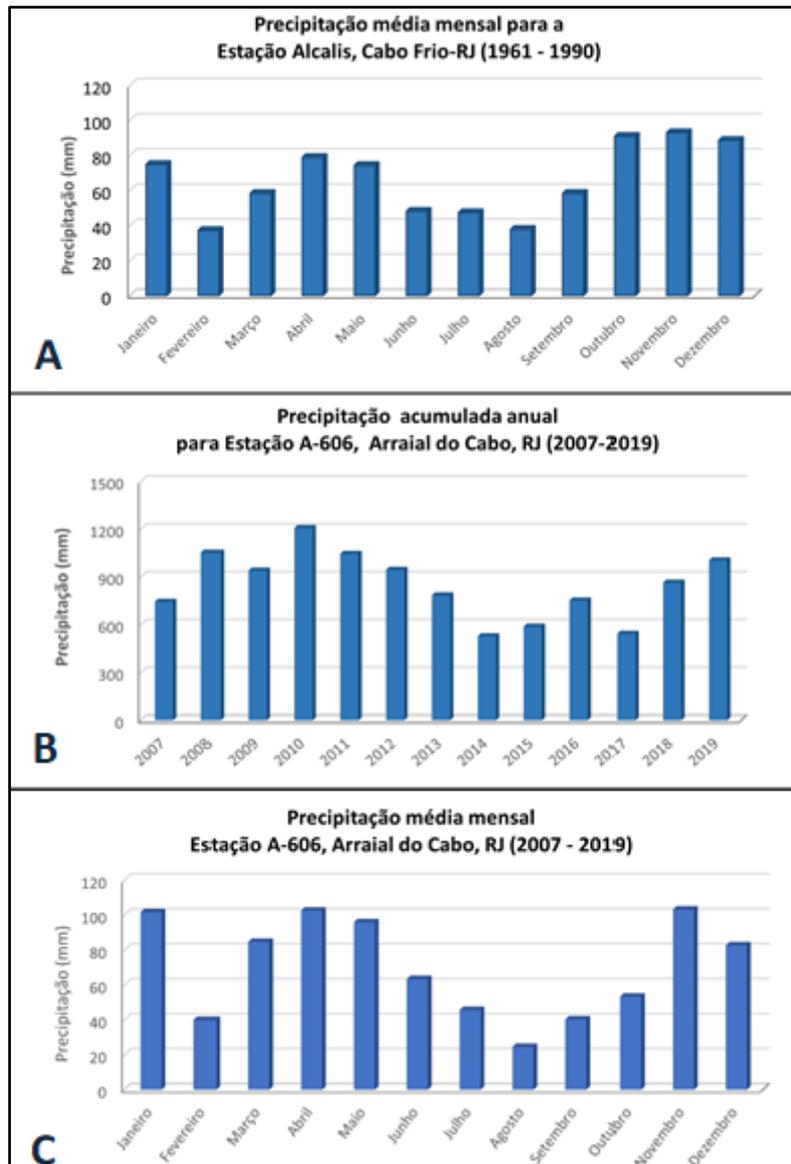
Os dados meteorológicos foram obtidos através do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil), representados por duas séries temporais distintas. A primeira consiste em registro histórico da antiga estação meteorológica Alcalis, a cerca de 9 km do campo de dunas, durante o período de 1961-1990 com coordenadas geográficas 22°52'58.8"S - 42°01'58.8"W (COE; CARVALHO, 2013). A segunda corresponde a nova estação automática de Arraial do Cabo (A606), localizada a cerca de 17 km do campo de dunas, durante o período de 2007 a 2019, com coordenadas geográficas 22°58'31.72"S - 42°1'17.36"W. Os dados meteorológicos foram organizados e apresentados de forma sistemática em gráficos distribuição das normais mensais e diárias, através do *software Grapher 10.5*.

As trajetórias de frequências de direções dos ventos foram geradas através do *software* HYSPLIT - versão *online*, utilizando a reanálise meteorológica, composta por uma base de dados globais desde 1948. A partir das coordenadas 22°49'19.2"S - 41°58'12.0"W, correspondente à ponta nordeste da Praia do Perú, foram geradas 12 trajetórias de frequências do tipo "forward" para cada mês de 2019. Na simulação das trajetórias dos ventos, foram selecionados os seguintes parâmetros: método de cálculo vertical; tempo total de execução de 48 horas; intervalo de seis horas entre cada geração de trajetórias e altura de 25 m.

O modelo HYSPLIT, anacrônico para *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*, é um híbrido entre a abordagem Lagrangiana, referencial móvel para os cálculos de advecção e difusão e a metodologia Euleriana que utiliza uma grade tridimensional fixa para calcular as concentrações de ar (STEIN et al., 2015). Esse modelo foi desenvolvido para modelar o transporte de massas de ar pelo ARL - *Air Resources Laboratory* da NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration* dos Estados Unidos. Esta ferramenta é usada para estimar a trajetória progressiva e reversa de uma determinada massa de ar. A análise reversa da trajetória (*backward*), auxilia na determinação da origem e fontes de partículas. Analisa também, a trajetória progressiva (*forward*) que determina a dispersão das partículas. Esse *software* utiliza tanto dados locais para simulação como dados das bases integradas da NCAR - *National Center for Atmospheric Research* e NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*.

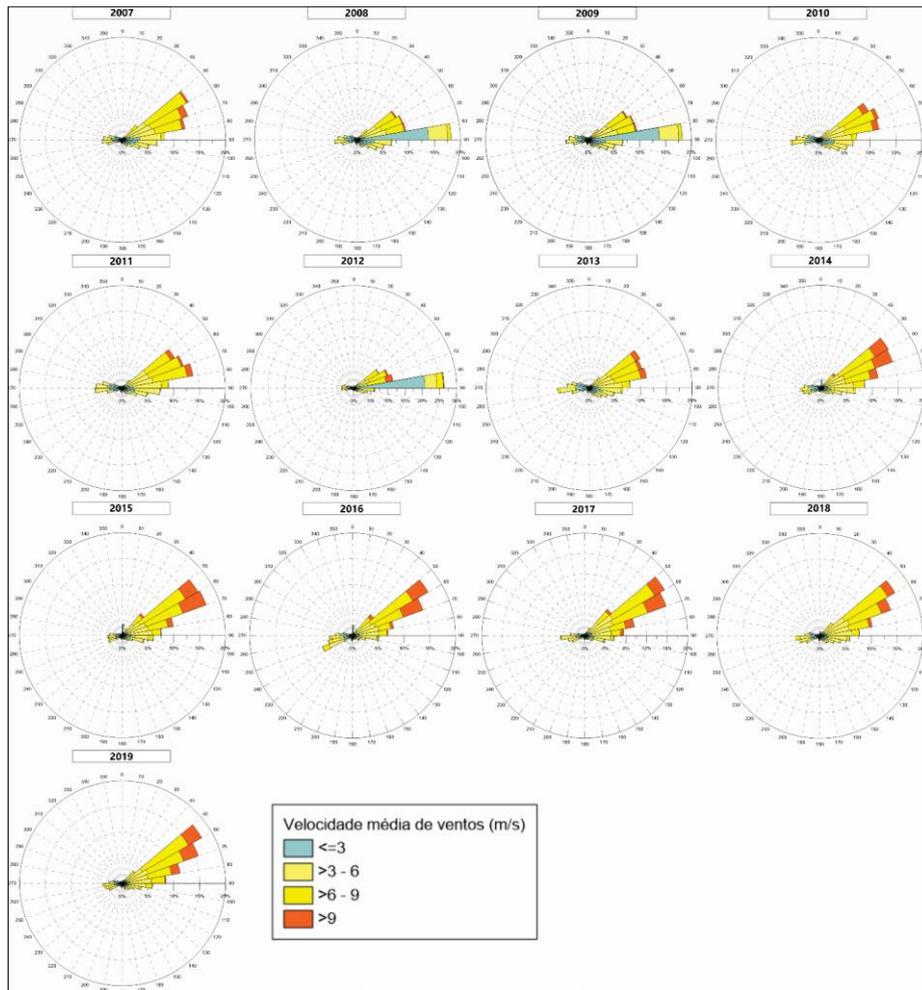
**4. Resultados**

A Figura 2 apresenta três gráficos de precipitação pluviométrica anual: (A) precipitação média mensal entre 1961 – 1990; (B) precipitação média mensal entre 2007 - 2019 e (C) precipitação média anual também entre 2007 - 2019. Verificou-se comportamento senoidal de subida entre 2007 e 2010, queda entre 2010 e 2014, seguido de uma nova subida dos índices pluviométricos. No entanto, os valores obtidos não ultrapassaram em nenhuma situação os 120 mm mensais.



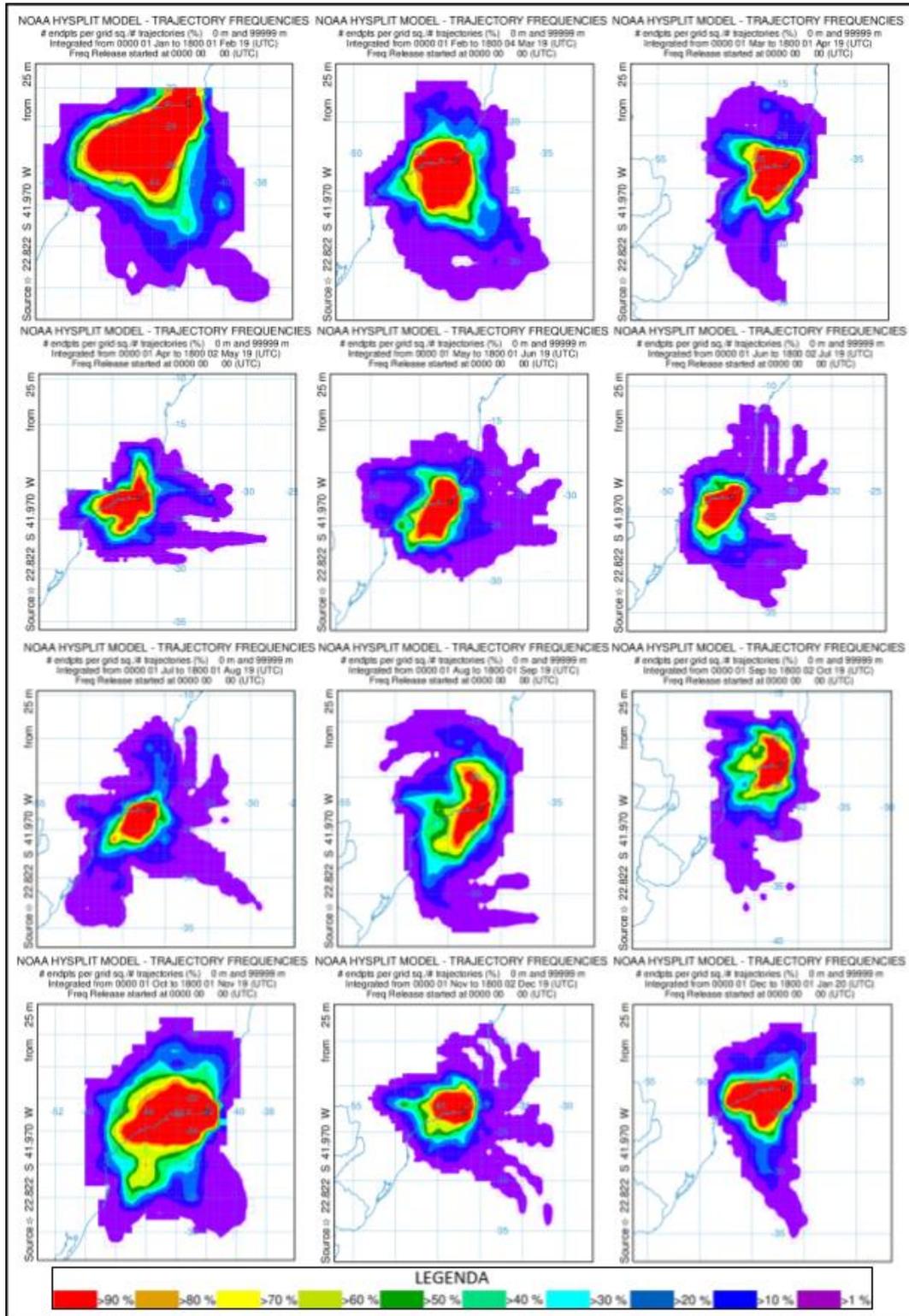
**Figura 2.** Distribuição da precipitação média anual e mensal para diferentes períodos de amostragem na região de Cabo Frio/RJ. O gráfico “A” apresenta precipitação média mensal entre 1961 e 1990; “B” demonstra a precipitação acumulada anual entre 2007 a 2019 e “C” representa a precipitação média anual de 2007 a 2019.

O regime de ventos caracteriza-se por distribuição homogênea ao longo da série temporal de 2007 a 2019, com variações nos quadrantes NE-ESE e menor frequência no quadrante E-SW. Ventos com maior intensidade são provenientes de NE, alcançando médias superiores a 9,0 m/s. Durante os anos de 2008, 2009 e 2012, ocorreu uma mudança no padrão de distribuição do regime de ventos com diminuição na frequência de nordeste e aumento de intensidade no quadrante leste (Figura 3).



**Figura 3.** Rosetas dos dados de ventos entre 2007 a 2019. Destaca-se que os ventos de maiores velocidades se encontram entre os ângulos 50 e 80°, correspondente à direção leste e nordeste e ventos com menor frequência e intensidade na direção oeste e sudoeste.

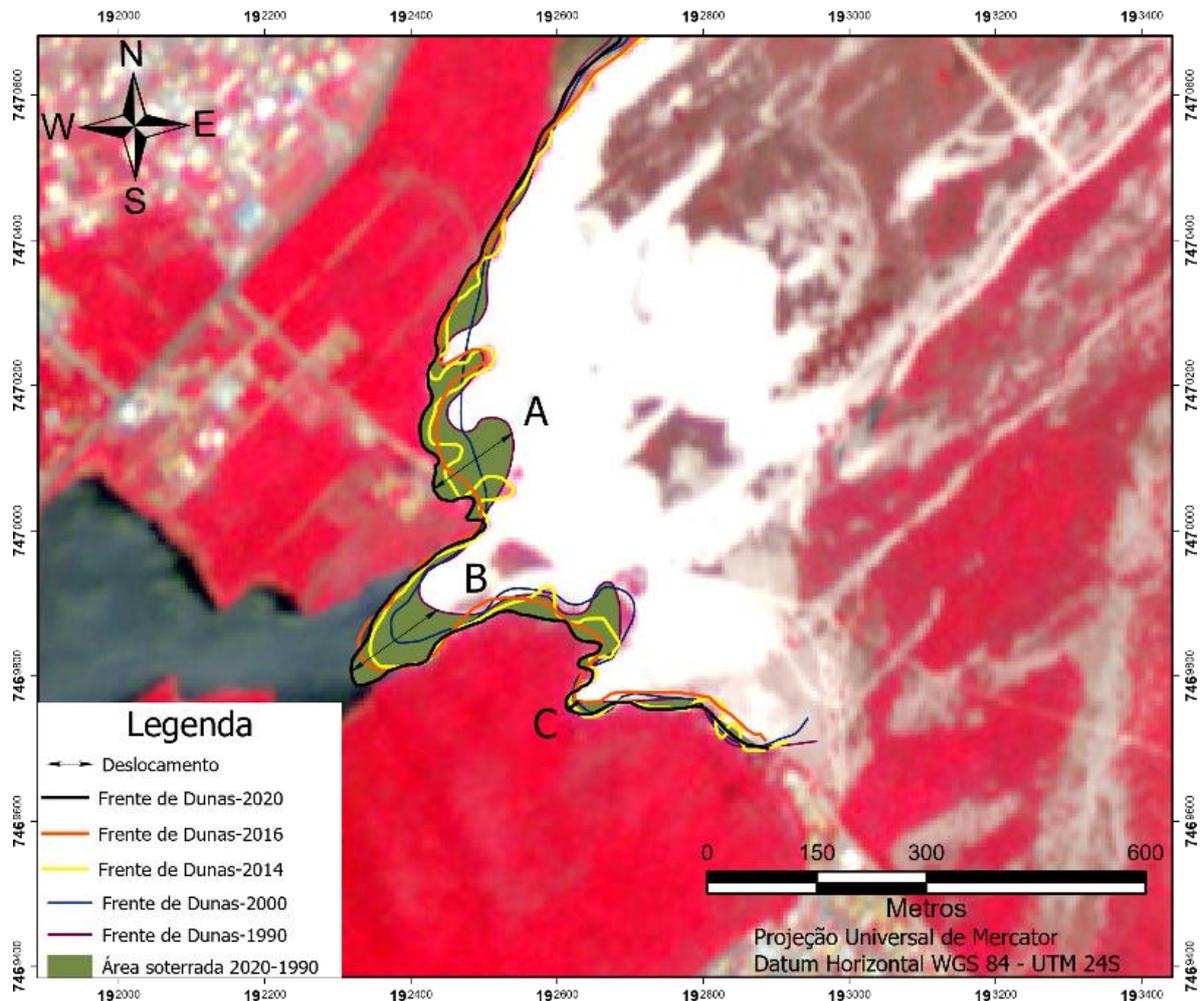
As simulações para frequências de ventos, geradas através do *software* HYSPLIT, apontam uma predominância de ventos na direção NE/SW, especialmente durante os meses de verão. Durante os meses de outono e inverno, registra-se aumento no espectro das direções de ventos provenientes dos quadrantes leste e sudeste, especialmente durante os meses de abril, maio e novembro (Figura 4).



**Figura 4.** Modelos da trajetória de vento tipo “frequência” com maior intensidade dos ventos na região de Cabo Frio/RJ. A cor roxa demonstra menor intensidade e a cor vermelha, maior intensidade. As trajetórias sugerem predominância dos ventos de direção NE-SW durante praticamente todo o ano, com poucas variações nos meses de outono e inverno.

Através da análise de imagens de diferentes anos entre 1990 e 2020, foi possível identificar o avanço do campo de dunas escalonares transgressivas sobre recursos hídricos (lagoa do Brejo do Matadouro), áreas urbanas e frentes montanhosas dos maciços costeiros. Durante o período analisado (entre 1990 – 2020), foram selecionadas três seções denominadas de “A”, “B” e “C”. As frentes de dunas móveis cavalgaram sobre a planície costeira da região do Perú na ordem de 131 m, 142 m e 17 m, respectivamente. A média anual da taxa de soterramento foi de 4,36

m/ano na seção "A", 4,7 m/ano na seção "B" e 0,5 m/ano na seção "C". O total de área soterrada entre o período analisado foi de 44.680 m<sup>2</sup> (Figura 5).



**Figura 5.** Áreas da planície costeira da região do Perú – Cabo Frio, submetidas a processo de soterramento entre 1990 e 2020. Cada linha representa diferentes anos analisados. As três seções obliquas "A", "B" e "C" representam as frentes de projeção de dunas móveis escalonares transgressivas. Imagem base de 2014. Fonte da imagem: RapidEye.

## 5. Discussão

Os gráficos de distribuição pluviométrica sugerem média anual entre 740 e 780 mm durante o período analisado. Nos meses de inverno, de julho a setembro, os índices pluviométricos não excedem 50 mm/mês. Valores inferiores foram registrados apenas no mês de fevereiro, com média acumulada entre 30,8 e 37 mm. Essa redução durante o mês de fevereiro associa-se possivelmente ao fenômeno da ressurgência costeira, no qual, as águas frias do fundo oceânico ascendem à superfície, reduzindo o índice de evaporação, e consequentemente o índice pluviométrico local. Considerando tal padrão de distribuição pluviométrica, estima-se que a movimentação das frentes de dunas na região do Perú é praticamente interrompida durante o verão, sendo retomada durante o inverno, correspondente ao período mais seco. Nas estações intermediárias, primavera e o outono, a movimentação de dunas está relacionada à entrada de frentes frias.

O clima, através dos índices pluviométricos, controla não somente a movimentação de dunas móveis, mas também o suprimento de sedimento para os campos de dunas através da praia e da planície de deflação eólica (CASTRO, 2001). As precipitações pluviométricas na região exercem uma forte influência no transporte de sedimento e na movimentação de dunas (CASTRO; ANTONELLO; GONÇALVES, 2003). Durante o inverno, correspondente a estação seca, entre os meses de julho a setembro, a taxa de transporte de sedimento é maior. No verão, entre os meses de janeiro a março, os índices pluviométricos são mais elevados, favorecendo uma menor

taxa de transporte eólico (CASTRO, 2006). No entanto, nunca chega a ser interrompida devido a intervalos de dias sem chuva e a potência do vento sobre a zona de alimentação do sistema eólico (praia). Conforme Rangel (2005), na primavera e no outono, o processo de movimentação é retomado, atingindo valores inferiores ao inverno.

De modo geral, a morfodinâmica do sistema sedimentar eólico da região do Perú é controlada pelo clima semiárido local com índices pluviométricos de em torno de 770 mm/ano e altas taxas de evaporação (RANGEL, 2005). O principal condicionante responsável pelos baixos índices pluviométricos é o efeito da ressurgência costeira sobre a região de Cabo Frio. Esse fenômeno consiste na subida de águas subsuperficiais, mais frias, para camadas superficiais no oceano, favorecendo baixa evaporação e, conseqüentemente, baixos índices pluviométricos (SILVA, 2009; CASTRO, 2018). As condições de semiaridez favorecem maior exposição dos sedimentos praias aos ventos de nordeste, colocando-os em trânsitos através da planície de deflação. Em seguida, esse material é depositado sobre as áreas mais elevadas, formando assim, o campo de dunas móveis escalonares de orientação oblíqua à linha de costa.

Os resultados obtidos através do *software* HYSPLIT corroboram dados da Estação Meteorológica A-606 de Arraial do Cabo e registros da Estação Álcis do Brasil no período de 1961 a 1990. As alterações nas direções de ventos foram observadas principalmente nos períodos de transição das estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) ou em condições de menor atuação do ASAS, correspondente aos quadrantes de ventos sudeste e leste. A projeção das frentes de dunas móveis transgressivas sobre a planície costeira de retaguarda não é constante em relação a distribuição espacial e temporal. Além das questões relacionadas ao clima semiárido da região, diferentes formas e feições morfológicas, vegetação, recursos hídricos e ocupação urbana são fatores de controle na projeção dessas dunas. Essa constatação ficou evidente através das diferentes taxas de soterramentos nos três segmentos analisados.

Conforme resultados obtidos através da Figura 5, as taxas de velocidades de movimentação do campo de dunas escalonares transgressivas da região do Perú, apresentaram valores diversificados. Na seção "B" correspondente a lagoa do Brejo do Matadouro, a velocidade de movimentação foi de 4,36 m/ano, enquanto nas frentes montanhosas "C" foi de 0,5 m/ano e no extremo oposto "A" foi de 4,7 m/ano. Entre as seções "A" e "B", a movimentação de dunas móveis, soterrou parcialmente a Estrada do Guriri de acesso à praia e o empreendimento Água Park, inviabilizando sua operacionalização. Comparando os valores obtidos nesse trabalho com os dados obtidos por Castro (2001) em dunas do litoral do Ceará, verificou significativas diferenças. Apesar dos índices pluviométricos anuais serem similares, as dunas do Ceará estão submetidas a regime de ventos mais intensos. A zona de alimentação (praia) desse sistema eólico do nordeste brasileiro é dominada por regime de mesomare, favorecendo uma maior exposição da pista de vento "fetch" e conseqüentemente maior movimentação de dunas.

Apesar da pluviosidade na região do Perú se equiparar aos índices do litoral do nordeste brasileiro, os resultados obtidos para as taxas de movimentação das dunas são consideravelmente baixas em relação às dunas do litoral do Ceará, que apresentam valores até três vezes mais altos do que os encontrados em Cabo Frio (CASTRO, 2001). Para o intervalo analisado de 30 anos, a área soterrada pela movimentação das dunas do Perú foi de 44.680 m<sup>2</sup>, o que é bastante significativo, considerando a área urbanizada no entorno. A Figura 6 mostra as áreas em processo de soterramento por dunas móveis sobre a região do Perú.

O transporte de sedimento eólico em direção ao campo de dunas escalonares "climbing dunes" é realizado por ocasião da baixa-mar. Nesta situação, a praia, denominada de zona de alimentação do sistema eólico por Castro (2001), apresenta um perfil mais largo, em torno de 80 m com ligeira inclinação em direção ao mar. Essas condições ambientais, somadas a ausência de chuva, favorecem a atuação dos processos físicos de sedimentação eólica. Os sedimentos da praia são transportados pelo vento em direção à planície de deflação "fetch" para depois serem depositados na forma de dunas. A Figura 7 mostra as características morfológicas da planície de deflação do campo de dunas estudado.



**Figura 6.** Áreas submetidas a processos de soterramentos por dunas sobre a região do Perú. (A) Processo de soterramento da planície costeira e áreas de preservação ambiental - APP's. (B) Projeção arenosa sobre a lagoa do Brejo do Matadouro.



**Figura 7.** Campo de dunas escalonares transgressivas do Perú. Planície de deflação coberta por vegetação, seguida por feições barcanas e barcanóides.

As transformações ocorridas na paisagem eólica do Perú se materializam através do processo de movimentação de dunas sobre a planície costeira. A dinâmica sedimentar eólica, impulsionada pelo regime de ventos predominantemente de nordeste, acarretou perdas patrimoniais significativas, envolvendo, bens públicos

e propriedades privadas (CASTRO, 2006). A partir de técnicas de sensoriamento remoto com imagens orbitais com resolução espacial entre 5 a 30 m, cobrindo um período de 30 anos, observaram-se modificações importantes quanto ao trânsito de sedimento e soterramento por dunas nesse segmento de litoral do sudeste brasileiro.

## 6. Conclusões

No decorrer deste trabalho verificaram-se que as transformações rápidas na paisagem costeira da região do Perú são decorrentes de processos eólicos naturais, principalmente relacionados às condições unimodais do regime de vento e a quantidade de sedimentos finos depositados no campo de dunas escalonares “*climbing dunes*”. Estas alterações tornaram-se mais aceleradas quando, nas últimas quatro décadas, o crescimento urbano da região ocorreu em direção às dunas escalonares transgressivas. Mantidas as condições atuais de ventos e precipitações pluviométricas, em médio prazo, em torno de 80 anos, o empreendimento Água Park, a estrada do Guriri e a lagoa do Brejo do Matadouro serão completamente soterrados pelas dunas. Realça-se que a ocorrência de maciços costeiros (frente montanhosa) funciona como barreira natural contra a expansão de grande parte do campo de dunas aqui estudado.

A movimentação da frente de dunas em direção à planície costeira do Perú, apesar de não ser constante durante o ano, vem causando diversos problemas de soterramentos no local. A Estrada do Guriri de acesso à praia e parte do empreendimento Água Park já foram em parte soterrados por feições eólicas oblíquas cavalgantes, acarretando assim, perdas patrimoniais envolvendo bens públicos e propriedades privadas. Os locais de soterramentos devem ser considerados como zonas de interdição e de proteção ambiental permanente - APP. Localmente as dunas móveis e fixas, caracterizam-se como zona de estabilização da linha praia, funcionam como barreira natural contra ressacas decorrentes de ondas de tempestades. É também habitat para diferentes espécies da fauna e flora da região litorânea, o que possibilitou a inclusão desse campo de dunas na Área de Proteção Ambiental do Pau-Brasil, Rio de Janeiro.

**Contribuições dos Autores:** A participação de todos os autores foi essencial para a realização deste trabalho. I. R. L. S participou de todas as etapas de desenvolvimento desta pesquisa, uma vez que o manuscrito apresentou parte dos resultados obtidos em sua pesquisa de mestrado. D. F. e C. L. C. também participaram de todas as etapas, principalmente na parte de metodologia; uso de *software* e validação; pesquisa e curadoria de dados. W. C. G. J. e D. M. V. O. foram responsáveis pela preparação e redação do artigo; revisão e edição do texto. J. W. A. C. participou da supervisão e revisão de toda a pesquisa.

**Financiamento:** Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq e a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia e Meio Ambiente – LAGECOST/UFRJ pelo suporte prestado ao desenvolvimento desta pesquisa. Também reconhecem a importante contribuição dos revisores anônimos para o aperfeiçoamento do artigo. E, por fim, agradecemos ao Professor Dr. Joao Wagner de Alencar Castro por todo conhecimento a nós passado.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

## Referências

1. AREIAS, C.; SPOTORNO-OLIVEIRA, P.; BASSI, D.; IRYU, Y.; NASH, M.; CASTRO, J. W. A.; TÂMEGA, F. T. S. Holocene sea-surface temperatures and related coastal upwelling regime recorded by vermetid assemblages, southeastern Brazil (Arraial do Cabo, RJ). *Marine Geology*, v. 425, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106183
2. BAGNOLD, R. A. A Further Journey Through the Libyan Desert. *The Geographical Journal*, v. 82, n. 2, p. 103-126, 1933. DOI: 10.2307/1785658
3. BAGNOLD, R. A. *The Physical of Blown Sand and Desert Dunes*. Ed. London: Methuen, 1941. 265p.
4. BARBIERI, E. B. Cabo Frio e Iguaba Grande, dois microclimas diferentes em um curto intervalo espacial. In: LACERDA, L. D. (org.). *Restingas: Origem, Estrutura e Processos*. CEUFF, Niterói, Brasil, 1984. p. 3-13.
5. CABRAL, C. L.; CASTRO, J. W. A.; CUNHA, A. M. Registros das Variações do Nível Relativo do Mar na Península de Armação dos Búzios, Rio de Janeiro: Análise de Dados Faciológicos e Geocronológicos. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 41, n. 1, p. 130-141, 2018. DOI: 10.11137/2018\_1\_130\_141

6. CASTRO, J. W. A. **Geomorfologia do sistema sedimentar eólico de Paracuru - Ceará**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geografia - Geomorfologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001. 202p.
7. CASTRO, J. W. A.; ÁVILA, C. A.; GONÇALVES, R. A. O sistema de dunas oblíquas do litoral de Cabo Frio – RJ. In: 4º Simpósio Nacional de Geomorfologia, 4., 2002, São Luís. **Boletim de Resumos**, Maranhão. 2002. 23p.
8. CASTRO, J. W. A.; ANTONELLO, L. L.; GONÇALVES, R. A. Dunas costeiras oblíquas do município de Cabo Frio / RJ - Brasil. **Ciências da Terra**, Monte Caparica - Portugal, v. 5, p. 26-29, 2003.
9. CASTRO, J. W. A. Burying processes carried out by a mobile transversal dunefield, Paracuru County, State Ceará, Brazil. **Environmental Geology**, v. 49, n. 2, p. 214-219, 2005. DOI: 10.1007/s00254-005-0055-6
10. CASTRO, J. W. A. Dunas da Praia do Peró – APA Pau Brasil – Cabo Frio / RJ: Movimentação de Sedimentos Eólicos e Problemas de Soterramento. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 43, 2006, Aracaju. **Anais do XLIII Congresso Brasileiro de Geologia**, Aracaju, Sociedade Brasileira de Geologia. 2006. p. 24-25.
11. CASTRO, J. W. A.; SUGUIO, K.; SEOANE, J. C. S.; CUNHA, A. C.; DIAS, F. F. Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, n. 2, p. 671-683, 2014. DOI: 10.1590/0001-3765201420140007
12. CASTRO, J. W. A.; MALTA, J. V.; MIGUEL, L. L. A. J.; CABRAL, C. L.; PASSEMILIO, A. B. Chronological reconstruction of aeolianites and transversal mobile dunes of northwest coast of Ceará State - Brazil, in the last 3000 cal yrs BP. **Aeolian Research**, v. 28, p. 51-57, 2017. DOI: 10.1016/j.aeolia.2017.07.006
13. CASTRO, J. W. A. (2018). The Morphodynamics Behaviour of a Cross-Shore Sandbar in a Microtidal Environment, Anjos Cove, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro – Brazil. In: BOTERO, C. M.; CERVANTES, O. D.; FINKL, C. W. (orgs.). **Beach Management Tools - Concepts, Methodologies and Case Studies**. Coastal Research Library 24, Springer International Publishing 2018: p. 319-329.
14. CASTRO, J. W. A.; SEOANE, J. C. S.; CUNHA, A. M.; MALTA, J. V.; OLIVEIRA, C. A.; VAZ, E. R.; SUGUIO, K. Comments to Angulo *et al.*, 2016 on “Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern - Brazil” by Castro *et al.*, 2014. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1369-1375, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201820171010
15. COE, H. H. G.; CARVALHO, C. N. Cabo Frio - um enclave semiárido no litoral úmido do Estado do Rio De Janeiro: Respostas do clima atual e da vegetação pretérita. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 17, n. 1, p. 136-152, 2013. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2013.74307
16. CUNHA, A. M.; CASTRO, J. W. A.; PEREIRA, F. M. B.; CARVALHO, M. A.; SUGUIO, K. Variações do nível relativo do mar durante o holoceno na bacia hidrográfica do Rio Una, região de Cabo Frio - Rio de Janeiro: aspectos sedimentológicos, faciológicos e geocronológicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, p. 143-154, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i1.1039
17. Esri Inc. **ArcGis Pro** (versão 2.6.0). Redlands, Estados Unidos, 2020.
18. FONSECA, R. B. M. **Evolução Batimétrica e Sedimentológica do Banco de Areia “SandBar” da Enseada dos Anjos, Arraial do Cabo – Rio de Janeiro**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2012. 106p.
19. FRYBERGUER, S. G. Dunes Forms End Wind Regime. In: MCKEE, E. D. (org.). **A Study of Global Sand Seas**. Geological Survey Professional Paper 1052, Printing Office, Washington, Estados Unidos, 1979. p. 137-169.
20. GOLDSMITH, V. Coastal Dunes. In: DAVIS JUNIOR, R. A. (org.). **Coastal Sedimentary Environments**. Springer, New York, Estados Unidos, 1978. p. 171-236.
21. GYLLENCREUTZ, R.; MAHIQUES, M. M.; ALVES, D. V. P.; WAINER, I. K. C. Mid to late-Holocene paleoceanographic changes on the southeastern Brazilian shelf based on grain size records. **The Holocene**, v. 20, n. 6, p. 863-875, 2010. DOI: 10.1177/0959683610365936
22. HESP, P. A. Conceptual models of the evolution of transgressive dunefield systems. **Geomorphology**, v. 199, p. 138-149, 2013. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.05.014
23. LETTAU, K.; LETTAU, H. H. Experimental and Micrometeorological Studies of Dune Migration. In: LETTAU, K.; LETTAU, H. H. (orgs.). **Exploring the World's Driest Climate**. University of Wisconsin Institute of Environmental Sciences - Madison, Wisconsin, Estados Unidos, 1978. p. 110-147.
24. MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M.; DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOUT, A. C. S. P. Quaternary sea-level history and variation in dynamics along the central brazilian coast: consequences on coastal plain construction. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 68, n. 3, p. 163-176, 1996.

25. MIGUEL, L. L. A. J.; CASTRO, J. W. A. Evolução Geomorfológica do Sistema Laguna - Barreira de Bilene, Costa de Moçambique, África: Padrões Climáticos e Dinâmica Sedimentar. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, p. 75-91, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i1.1276
26. MUEHE, D.; VALENTINI, E. **O Litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental**. Ed. FEMAR, 1998. 99p.
27. MUEHE, D. **Erosão e Progradação no Litoral Brasileiro**. Segunda Ed. MMA: Dieter Muehe, 2006. 476p.
28. NICKLING, W. G. **Aeolian Geomorphology**. Ed. London: Allen and Unwin, 1986. 311p.
29. PYE, K.; TSOAR, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. Ed. London: Unwin Hyman, 1990. 395p.
30. RANGEL, F. E. **O Campo de Dunas Escalonares na Praia do Peró – Cabo Frio/RJ: transporte de sedimentos, formas resultantes e impactos associados**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005. 97p.
31. REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-55, 2009. DOI: 10.1590/S0102-77862009000100005
32. RIBEIRO, A. Y. **Balanco sedimentar num sistema de dunas frontais sob os regimes de ventos dominantes da terra para o mar. Praia de Massambaba, Arraial do Cabo - RJ**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001. 258p.
33. SHERMAN, D. J.; HOTTA, S. Aeolian Sediment Transport: Theory and Measurements. In: NORDSTROM, K. F.; PSUTY, N. P.; CARTER, R. W. G. (orgs.). **Coastal Dunes: Form and Process**. John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 1990. p. 17-37.
34. SILVA, A. C. **Dinâmica Batimétrica e Sedimentológica da Região do Cabo Frio, Estado do Rio de Janeiro**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009. 157p.
35. SIMONS, D. B.; RICHARDSON, E. V.; NORDIN JUNIOR, C. F. Bedload equation for ripples and dunes. **United States Geological Survey**, v. 462, n. H, p. H1-H9, 1965. DOI: 10.3133/pp462H
36. STEIN, A. F.; DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D.; STUNDER, B. J. B.; COHEN, M. D.; NGAN, F. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. **Bull. American Meteoric Society.**, v. 96, n. 12, p. 2059-2077, 2015. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1
37. VALENTIN, J. L. Analyse des paramètres hydrobiologiques dans la remontée de Cabo Frio (Brésil). **Marine Biology**, v. 82, p. 259-276, 1984. DOI: 10.1007/BF00392407
38. WERNER, K.; ILENBERGUER, W. K.; RUST, L. A sand budget for the Alexandria coastal dunefield, South Africa. **Sedimentology**, v. 35, n. 3, p. 513-521, 1988. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1988.tb01001.x



obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.