

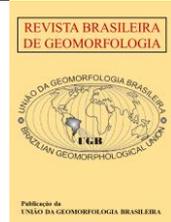


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 26, nº 4 (2025)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v26i4.2718>



Artigo de Pesquisa

Interação entre Vegetação e Dunas Costeiras: o Fenômeno do Greening no Campo de Dunas do Perú, Cabo Frio (RJ)

Interaction between Vegetation and Coastal Dunes: The Greening Phenomenon in the Perú Dune Field, Cabo Frio (RJ)

Thiago Gonçalves Pereira ¹ e Daniel Marques de Abreu ²

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Geografia – Programa de Pós-graduação em Geografia, Rio de Janeiro, Brasil. thiagopereira.uerj@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6005-3823>

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Geografia – Programa de Pós-graduação em Geografia, Rio de Janeiro, Brasil. daniel.abreu1501@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0004-4385-4433>

Recebido: 25/06/2025; Aceito: 18/08/2025; Publicado: 25/09/2025

Resumo: O campo de dunas do Perú, localizado no município de Cabo Frio (RJ), vem passando por transformações morfológicas significativas devido à expansão da vegetação sobre áreas antes ocupadas por sedimentos livres, fenômeno conhecido como *greening*. Este estudo investigou as relações entre alterações na vegetação e processos geomorfológicos associados, utilizando dados multitemporais de NDVI (1984–2023), imagens Sentinel-2 (2015–2024) e levantamento aerofotogramétrico. Os resultados indicam aumento dos valores de NDVI ao longo das últimas décadas, com elevação de 134,6% na média anual entre 1992 e 2023. A análise sazonal demonstrou maiores índices durante os períodos chuvosos, principalmente entre novembro e fevereiro, com destaque para os meses de janeiro e dezembro, enquanto junho apresentou os maiores valores entre os meses secos. As imagens Sentinel-2 confirmaram o avanço expressivo da vegetação nas áreas centrais e sul do campo dunar, antes dominadas por sedimentos expostos. O mapeamento detalhado mostra manchas densas de espécies invasoras, formação de trilhas de uso humano e o crescimento da vegetação sobre as faces de sotavento das dunas parabólicas, que tende a reduzir sua migração natural. Esses resultados indicam a atuação combinada de fatores ambientais e antrópicos na intensificação do *greening*, com importantes consequências para a conservação desse ambiente costeiro, como o risco à acelerada estabilização dos campos de dunas móveis, homogeneização de habitats e perda da geodiversidade costeira.

Palavras-chave: *Greening*; Cobertura vegetal; NDVI; Variações climáticas. ARP.

Abstract: The Perú dune field, located in Cabo Frio (RJ), has undergone significant morphological transformations associated with vegetation expansion over previously unvegetated sandy areas, a process known as *greening*. This study investigates the relationship between vegetation changes and geomorphological processes linked to this phenomenon, using multitemporal NDVI data (1984–2023), Sentinel-2 imagery (2015–2024), and high-resolution surveys with remotely piloted aircraft. The results indicate a marked increase in NDVI values over recent decades, with a 134.6% rise in the annual average between 1992 and 2023. Seasonal patterns reveal higher NDVI values during the rainy period, especially from November to February, with January and December standing out, while June recorded the highest values among dry-season months. Sentinel-2 imagery confirmed vegetation expansion in the central and southern sectors of the dune field, previously dominated by exposed sediments. High-resolution mapping shows dense patches of invasive species, the formation of human-use trails, and vegetation growth on the leeward faces of parabolic dunes, which tends to reduce the natural migration. These results indicate the combined action of environmental and anthropogenic drivers in intensifying *greening*, with important

consequences for the conservation of this coastal environment, including the risk of accelerated stabilization of mobile dune fields, habitat homogenization, and loss of coastal geodiversity.

Keywords: *Greening*; Vegetation cover; NDVI; Climate variability; RPA.

1. Introdução

As dunas costeiras são ecossistemas extremamente sensíveis e espacialmente limitados, frequentemente entre os mais impactados pela ação humana (Carter, 1988). Formadas no contexto geomorfológico recente do Quaternário, sobretudo no Pleistoceno tardio e Holoceno, as dunas costeiras constituem feições efêmeras altamente dinâmicas, cuja configuração morfológica resulta da interação não linear entre processos eólicos, sedimentares e biológicos, sendo esta última um dos principais agentes estabilizadores durante seu desenvolvimento (Hesp, 2002; Baas e Nield, 2007; Pereira et al., 2010; Luna et al., 2011). Essas feições são compostas por sedimentos arenosos de granulometria fina a muito fina, geralmente oriundos da zona submarina proximal, associadas às praias intermediárias e dissipativas, e caracterizadas por elevada energia dos ventos que retrabalham/transportam o excedente de material para o interior da planície. Assim, a morfodinâmica desses sistemas exprime um estado de equilíbrio metaestável, sustentado pelo volume e tipo de material como fonte sedimentar, intensidade e persistência dos ventos que superem o limiar de arraste e pela atuação das comunidades vegetais que operam na retenção desses sedimentos (Fernandez et al., 2017; Da Silva e Hesp, 2013). Esses elementos se combinam de maneira sensível e podem transformar todo o sistema quando quaisquer desses vetores são alterados por pressões antrópicas ou pela intensificação das mudanças climáticas.

Nas últimas décadas, a rápida expansão da cobertura vegetal em dunas costeiras tornou-se foco de diversas investigações ao redor do mundo em função de seus efeitos sobre a dinâmica natural desses sistemas (Da Silva e Hesp, 2013; Petrova et al., 2023; Gao et al., 2023; 2024). Esse fenômeno, conhecido como *greening* (traduzido como “verdeamento”) caracteriza-se pelo processo de substituição dos sedimentos expostos por cobertura vegetal arbórea, arbustiva ou herbácea, conforme Jackson et al. (2019). Embora, em muitos casos, essa cobertura vegetal tenha papel relevante na proteção contra a erosão eólica (em dunas frontais, e contra a erosão costeira), a sua expansão excessiva pode provocar impactos adversos, como a estabilização das dunas em larga escala, afetando a capacidade de transgressão natural frente à elevação do nível do mar e à incidência de tempestades (Jackson et al., 2019).

O avanço da vegetação sobre dunas móveis tende a reduzir sua mobilidade e dinamismo geomorfológico, criando campos de dunas mais uniformes e com menor diversidade ambiental (p. ex. menos áreas de areia exposta). Essa estabilização empobrece o mosaico de micro-habitats característicos das dunas em transição, eliminando nichos para espécies psamófilas e reduzindo a riqueza local de plantas e artrópodes típicos de ambientes arenosos ativos, conforme mostrado em Brunbjerg et al., (2014), Brumbjerg et al. (2015) e Petrova et al. (2023). Estudos sobre a resiliência desses ambientes indicam que maior diversidade biológica e diversidade de respostas funcionais são elementos-chaves para a capacidade dos ecossistemas de resistir a perturbações (Elmqvist et al., 2003), assim, a homogeneização dos habitats promovida pelo *greening* tende a empobrecer essa diversidade funcional e reduzir a resiliência às perturbações externas e aos impactos que influenciem fatores ambientais típicos.

Dentre esses fatores, associados ao crescimento da vegetação, estão: temperatura, concentração de CO₂ e outros gases de efeito estufa, precipitação, regime de ventos e disponibilidade de sedimentos (Jackson et al., 2019; Petrova et al., 2023) (Figura 1). A temperatura define o período de crescimento anual da vegetação, enquanto o CO₂ atua diretamente no desenvolvimento das plantas (fotossíntese), já outros gases atmosféricos podem influenciar indiretamente o processo. A precipitação garante água e umidade necessária para germinação e crescimento, que ocorre especialmente durante os períodos chuvosos. Por sua vez, o regime de ventos afeta a capacidade de transporte de areia, e a redução desse transporte entre a praia e as dunas favorece a fixação da vegetação na superfície das áreas de pós-praia. A erosão costeira também é um elemento importante e tem relações diretas com esse fenômeno. Numa escala global, Luijendijk et al. (2018) estimam que cerca de 25% das praias arenosas enfrentam redução de sedimentos, o que contribui para déficit de sedimentos para a planície costeira adjacente, influenciando diretamente na intensificação do fenômeno do *greening* sobre dunas.

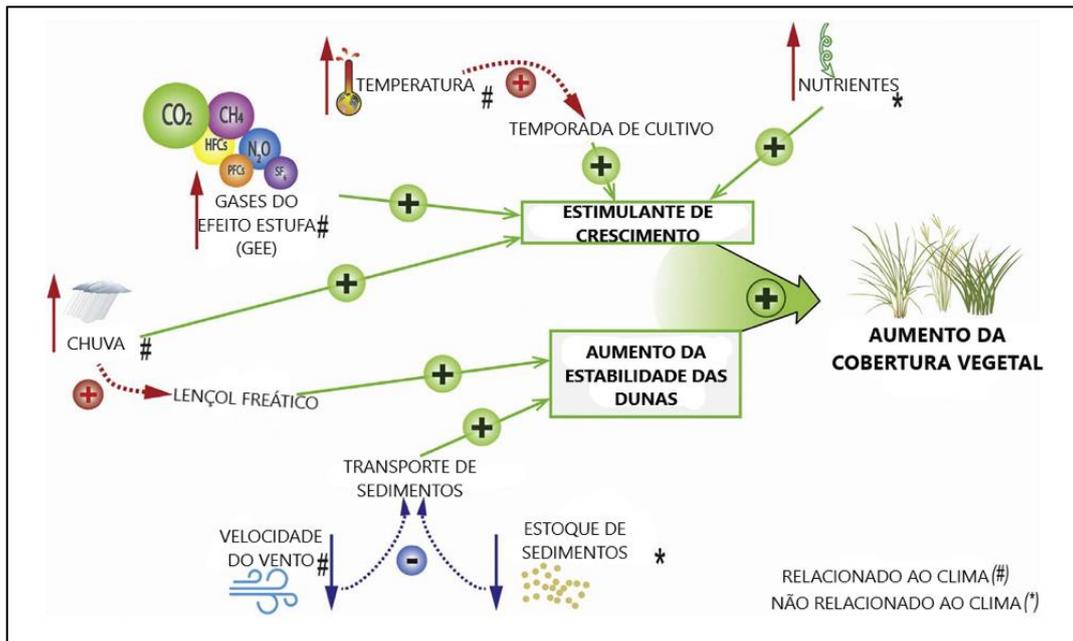


Figura 1. Fatores ambientais associados ao aumento da vegetação em dunas costeiras. Traduzido de Jackson et al., (2019).

Jackson et al., (2019) destacam que, em escala global, diversos fatores ambientais têm gerado condições mais favoráveis à expansão da vegetação em sistemas dunares costeiros, especialmente devido a alterações nos regimes climáticos e atmosféricos (Figura 2). Em contrapartida, nas escalas locais e regionais, essa dinâmica é condicionada sobretudo pela disponibilidade de sedimentos arenosos, que define diretamente o potencial de colonização e manutenção da cobertura vegetal pioneira (Short e Hesp, 1982; Hesp, 1988, 2013; Gao et al., 2024). Ou seja, enquanto as mudanças climáticas globais atuam como forças reguladoras mais abrangentes, influenciando ciclos atmosféricos e eventos extremos, (Carter, 1991; Jackson et al., 2019), a sazonalidade climática regional atua mais diretamente no controle e expansão da cobertura vegetal a partir de características físicas locais desses ambientes. Períodos úmidos proporcionariam melhores condições hídricas para crescimento, estabilização e adensamento da vegetação, ao passo que períodos secos, caracterizados por precipitação reduzida e capacidade de transporte eólico superior, tendem a restringir a expansão ou até mesmo retraindo a cobertura vegetal, resultando na maior mobilidade das dunas.

Nesse sentido, a variabilidade associada ao El Niño Oscilação Sul (ENSO) influencia fatores como precipitação e temperatura no sudeste da América do Sul (incluindo o Sudeste do Brasil), produzindo anomalias sazonais contrastantes entre El Niño e La Niña (Grimm, 2003; Tedeschi et al., 2016). Com isso, condições de La Niña (que geram ventos mais brandos e maior precipitação) tendem a reduzir o transporte eólico de sedimentos, favorecendo o acúmulo de vegetação em dunas (*greening*). Por outro lado, o El Niño (que produz chuvas escassas e ventos mais fortes) tenderia a deflagrar efeito contrário, limitando o crescimento vegetal. Essa influência também repercute no campo de ventos e no clima de ondas do Atlântico Sul, alterando o suprimento no sistema praia-duna e, por consequência, a mobilidade e a colonização vegetal em sistemas dunares mais interiores (Hesp, 2002; Ramos et al., 2021).

Além desses aspectos naturais, há consenso na literatura de que intervenções antrópicas locais desempenham papel decisivo no desencadeamento e na intensificação do *greening* (Jackson et al., 2019; Gao et al., 2020; Petrova et al., 2023). Entre os vetores mais recorrentes destacam-se: (i) a mudança de uso e cobertura da terra; (ii) programas de estabilização artificial que introduzem gramíneas ou árvores exóticas pioneiras; e (iii) o incremento da rugosidade superficial resultante de infraestruturas urbanas — todos capazes de reduzir a mobilidade e favorecer o adensamento vegetal sobre áreas antes dominadas por superfícies arenosas expostas (Tribe e Kennedy, 2010; Gao et al., 2022; 2024). Soma-se a esses fatores a deposição atmosférica de nitrogênio proveniente da poluição urbana e industrial, que atua como fertilizante difuso, acelerando o crescimento da vegetação e reforçando o processo de estabilização das dunas (Provoost et al., 2011; Petrova et al., 2023).

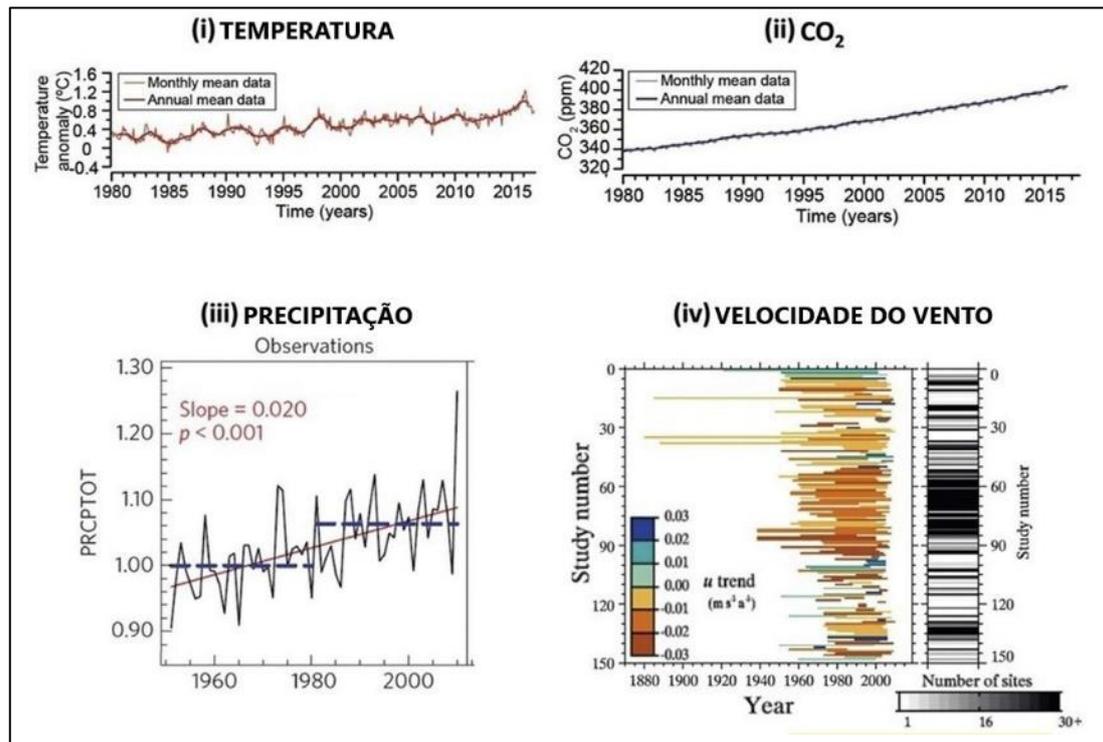


Figura 2. Tendências globais de variáveis climáticas. Traduzido de Jackson et al. (2019).

No campo de dunas do Perú, localizado na região das Baixadas Litorâneas do estado do Rio de Janeiro, observa-se um processo de expansão da vegetação, levantando preocupações quanto ao avanço do fenômeno do *greening* na região. Pesquisas anteriores, como em Muehe et al. (2010) e Mansur e Carvalho (2011) já revelaram o crescimento da vegetação arbustiva desde meados do século XX, sugerindo que o local vem sofrendo alterações ecológicas expressivas nos sistemas dunares ali presentes.

Diante dos múltiplos fatores associados ao processo de *greening*, torna-se essencial investigar se a expansão da vegetação observada no campo de dunas do Perú está de fato relacionada a esse fenômeno. Tal análise contribui para o entendimento das dinâmicas ecológicas e geomorfológicas locais e para avaliação das possíveis implicações sobre a estabilidade e resiliência desse ecossistema costeiro. Assim, este trabalho tem como objetivo principal verificar o padrão de comportamento da cobertura vegetal nos campos de dunas do Perú nas últimas décadas. Para isso, foi proposto analisar a expansão da vegetação na área, avaliar as transformações provocadas pelo aumento da cobertura vegetal e correlacionar a intensidade desse crescimento com as variações sazonais de alguns parâmetros físicos da região, considerados como essenciais no comportamento deste fenômeno.

2. Área de Estudo

Entre o cabo Frio e o cabo Búzios desenvolvem-se campos de dunas transgressivos, com destaque para o campo de dunas do Perú, situado na porção central da linha de costa entre os municípios de Cabo Frio e Armação dos Búzios (Pereira et al., 2010; Fernandez et al., 2017). Com 214,27 hectares, é o segundo maior da região, atrás apenas do campo de dunas da Dama Branca (Pereira et al., 2010). A Figura 3 indica a localização do campo de dunas do Perú.

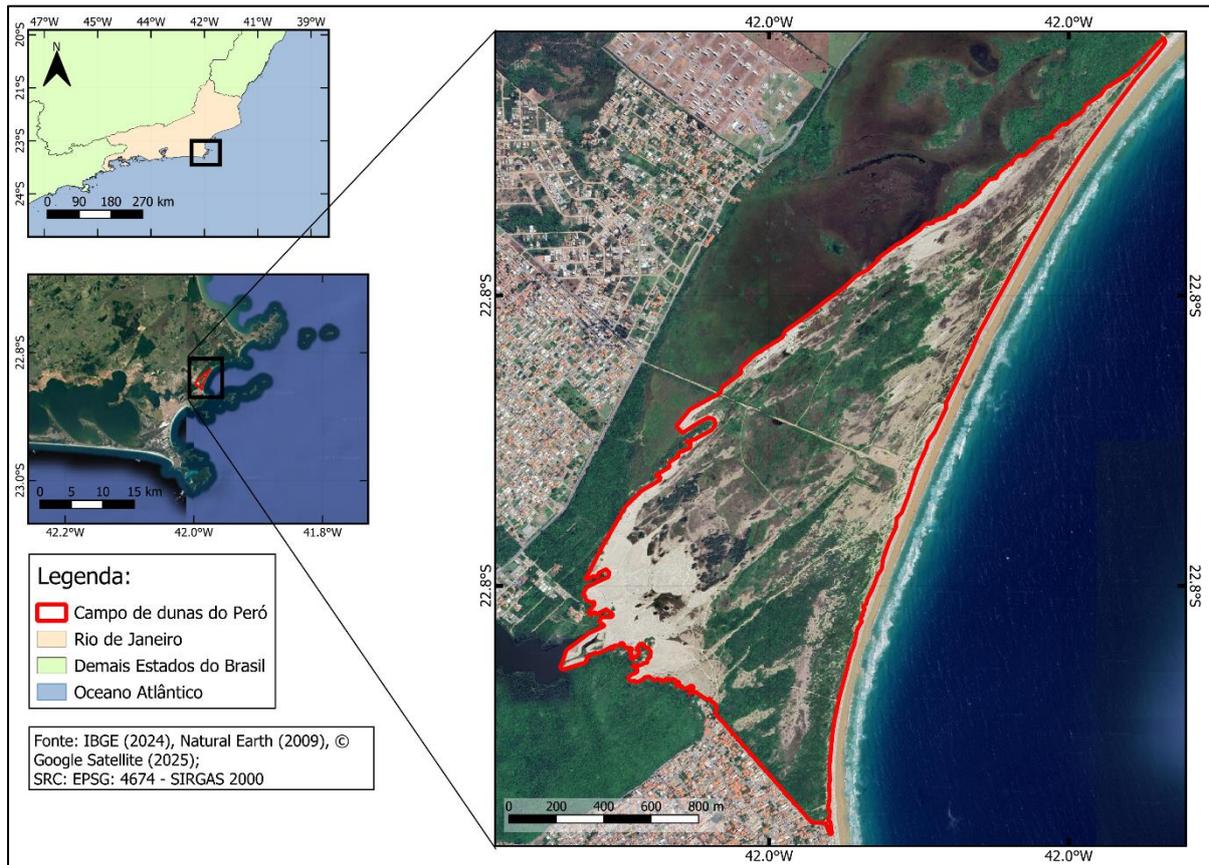


Figura 3. Mapa de localização do campo de dunas do Peró (RJ). Elaborado pelos autores.

A região reúne o mais expressivo registro de feição eólica ativa do Sudeste brasileiro, destacando-se pelo volume sedimentar, variedade de formas e orientação oblíqua à linha de costa (Castro et al., 2003). A Tabela 1 sintetiza os principais condicionantes naturais associados à formação desses sistemas.

Condicionantes naturais	Descrição
Clima	<ul style="list-style-type: none"> - Classificação climática (Köppen–Geiger) como Semiárido Quente - BSh (Barbieri, 1984). - Presença da Zona de Ressurgência Oceânica, afetando a ocorrência de chuvas convectivas (Martin e Sugio, 1989; Turc et al., 2010). - Fracas taxas de precipitação e de evaporação (Barbieri, 1984; Martin e Suguio, 1989). - Inverno com estação seca e verão com estação chuvosa (Freitas et al., 2005). - Ventos predominantes de NE; em frentes frias, ventos de S e SO (Barbiere, 1985).
Vegetação	<ul style="list-style-type: none"> - Alta diversidade fisionômica e florística, com elevado grau de endemismo (Bohrer et al., 2009). - Enclave fitogeográfico (Coe et al., 2007; Coe e Carvalho, 2013). - Características da caatinga do nordeste brasileiro, com predominância de cactáceas e bromeliáceas (Mooney et al., 1995; Coe et al., 2007). - Centro de Diversidade Vegetal da Região Neotropical (Araujo, 1997; Bohrer et al., 2009). - Composição florística xeromórfica, adaptada às adversidades climáticas (Araujo, 1997).

	- Introdução de espécies exóticas invasoras, como <i>Casuarina equisetifolia</i> L. (Bohrer et al., 2009).
Aspectos geomorfológicos e geológicos	- Domínios geológicos com embasamento cristalino e depósitos sedimentares costeiros (Da Silveira et al., 2021). - Menor ocorrência de chuvas orográficas pelo afastamento da Serra do Mar (Barbieri e Coe Neto, 1999). - Domínio Tectônico de Cabo Frio (CTFD), do Neoproterozoico ao Quaternário (Heilbron et al., 2000). - Três unidades fisionômicas: planícies costeiras; baixos morros e ilhas costeiras; e morros continentais (Araujo, 1997).
Estágio morfodinâmico associado à formação de dunas	- Formação de dunas em praias com estágios morfodinâmicos intermediários e dissipativos (Fernandez et al., 2020). - Principal fonte de sedimentos finos é proveniente da plataforma continental (Muehe e Valentini, 1998). - Transporte sedimentar essencial para manutenção e evolução dos campos de dunas (Fernandez et al., 2020).

Tabela 1. Fatores ambientais e geomorfológicos condicionantes à formação e evolução das dunas costeiras em Cabo Frio (RJ). Elaborado pelos autores.

Além dos aspectos mencionados acima, a influência antrópica foi intensificada a partir da urbanização acelerada da região das Baixadas Litorâneas, ameaçando diretamente todos os ecossistemas dunares localizados entre o cabo Frio e o cabo Búzios. Entre as principais pressões estão: introdução de espécies exóticas invasoras, como a Casuarina (*Casuarina equisetifolia* L., conhecida também como pinheiro australiano), criação de animais em áreas de dunas, expansão urbana e práticas inadequadas de manejo (Konlechner et al., 2015; Moulton et al., 2018; Lopez e Hesp, 2023). Outro impacto antrópico relevante decorre da pressão exercida por grandes empreendimentos turísticos-imobiliários de alto padrão. Os terrenos onde se desenvolvem os campos de dunas têm sido alvos sistemáticos desses projetos de grande porte, como o caso do “Club Med Peró”, empreendimento que, no início do século XXI, tentou se instalar nas imediações do campo dunar, que previa ocupação de praticamente toda a área contígua desde a retaguarda das dunas frontais até as feições eólicas mais afastadas da linha de costa (Saleme, 2016).

3. Materiais e Métodos

A metodologia adotada foi estruturada em duas etapas principais: (3.1) análise multitemporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) e (3.2) trabalho de campo com observação direta e aerolevantamento por aeronave remotamente pilotada (ARP) para geração de imagens de alta resolução. A integração de técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e coleta de dados em campo foi fundamental para garantir a robustez das análises da dinâmica vegetacional associada às dunas.

3.1. Análise multitemporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI é o índice para estimar a cobertura vegetal e para detectar mudanças de padrão no uso e cobertura da terra (Shimabukuro, 1998). Ele é gerado a partir da aplicação de operações matemáticas entre bandas de sensores de satélite para processos de realce (Melo et al., 2011). Para isso, foram extraídos dados tanto da plataforma Climate Engine quanto de imagens do satélite Sentinel-2 em softwares especializados em ambiente SIG, como QGIS e *Google Earth Engine* (GEE). É calculado pela fórmula, onde NIR representa a reflectância no infravermelho próximo e Red a reflectância no vermelho:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (1)$$

A plataforma *Climate Engine* utiliza imagens dos satélites Landsat 5, 7, 8 e 9, com resolução espacial de 30 metros, abrangendo uma base de dados de 1984 a 2023. A partir dela, foram geradas as séries temporais do NDVI e gráficos de tendências para o período disponível. Destacou-se também os valores do NDVI para os meses chuvosos (identificado como os meses de novembro a fevereiro) e para os meses secos (identificado como os meses de junho a setembro), possibilitando uma avaliação das variações sazonais e de longo prazo (interdecadal) na cobertura vegetal. A análise considerou 222 registros referentes aos meses selecionados entre 1984 e 2023. A série, contudo, apresenta descontinuidade, devido a disponibilidade dos dados da plataforma.

Complementarmente, foram extraídas imagens do satélite Sentinel-2, que possui resolução espacial de 10 metros, ideal para observação espacial mais detalhada. Essas imagens, relativas ao período de 2015 a 2024, serviram para analisar a espacialidade da cobertura vegetal. Foram selecionadas duas cenas por ano, uma na estação seca e outra na chuvosa, com o intuito de captar as variações sazonais e os efeitos associados a eventos climáticos como *El Niño* e *La Niña*. Os dados foram processados e analisados em SIG para a geração de mapas e avaliação da distribuição e densidade da vegetação ao longo do tempo.

3.2. Levantamento Aerofotogramétrico

Foram realizados dois trabalhos de campo para esta pesquisa:

- Entre 20 e 22 de maio de 2024: de caráter exploratório com reconhecimento da área de estudo, registro fotográfico de pontos de interesse e avaliação inicial de indicadores relevantes, como manchas densas de vegetação exótica, trilhas, cortes eólicos, feições de deflação ativas e observação de área(s) prioritária(s) para o mapeamento.
- Entre 2 e 4 de setembro de 2024: planejamento e execução do aerolevantamento com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), incluindo a marcação de pontos de apoio para georreferenciamento com equipamentos GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que garantiram maior precisão. O período seco foi escolhido a fim de (i) minimizar o verdejamento efêmero de herbáceas sazonais e, assim, não superestimar a cobertura; (ii) maximizar o contraste visual entre areia exposta e núcleos vegetados, para melhor segmentação; (iii) operar sob baixa nebulosidade e umidade do solo reduzida, melhorando a qualidade fotogramétrica e nitidez dos pontos de amarração para o processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE); e (iv) registrar o estado de maior mobilidade potencial do sistema.

As imagens obtidas possibilitaram o mapeamento do campo de dunas, bem como a produção de uma modelagem tridimensional (MDE) para a caracterização morfológica, análise dos padrões de vegetação e também o registro da diversidade de formas presentes na região. A utilização de ARP para realização de um levantamento aerofotogramétrico tem um importante papel na medição rápida de uma grande superfície com alta resolução espacial e baixo custo operacional (Guisado-Pintado et al., 2019). Os voos de baixa altitude permitiram gerar ortofotomosaicos centimétricos e modelos digitais de superfície que capturam micro relevos, trilhas antropogênicas e núcleos de vegetação com precisão impossível de alcançar por sensores orbitais de média resolução.

O aerolevantamento foi efetuado sob condições de poucas nuvens e velocidade do vento abaixo de 10m/s. A ARP utilizada foi o modelo DJI Air 2S, que fez uma varredura de 48 hectares, abrangendo a porção mais interior da planície de deflação, onde se estabelece a duna megaforma (a maior feição de duna transgressiva da planície, formada pela coalescência de dunas menores) e algumas feições semifixas, no setor centro-sul do arco praiado do Perú. A escolha dessa área baseou-se na concentração de indicadores ambientais relacionados à expansão da vegetação que foram observados na primeira campanha e que também foram mencionados por Muehe et al. (2010). Para isso, foi utilizado um aplicativo para voo autônomo onde se inseriu o plano de voo com os parâmetros de aquisição de imagens: altitude de 100m, superposição lateral e frontal de 70 e 80%, respectivamente e GSD (*ground sample distance*) < 10 cm.

Foram distribuídos 15 pontos de apoio geodésico, divididos entre pontos de controle e de verificação, georreferenciados com receptores GNSS. Utilizou-se o sistema GNSS em modo RTK (*Real Time Kinematic*), que permite alta precisão posicional em tempo real, reduzindo significativamente o erro nas coordenadas geográficas. O erro médio quadrático obtido foi de até 25,3 centímetros no componente altimétrico, atendendo à classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) para escala de até 1:5.000 (Brasil, 1984).

O processamento fotogramétrico foi realizado com o software *Agisoft Metashape Professional* (versão 2.1.2). No fluxo de trabalho do programa gerou-se produtos geoespaciais como: nuvem de pontos densa, modelos tridimensionais (texturizados), modelos de superfície (MDE/MDT) e mosaicos ortorretificados georreferenciados compatíveis com SIG. Essas ferramentas deram suporte às análises geomorfológicas e mapeamento de vegetação integrados ao ambiente SIG.

4. Resultados

4.1. Tendências temporais do NDVI (1984-2003)

Os dados de NDVI mostram forte incremento ao longo de quatro décadas (Figura 4A). A média anual (Figura 4B) do índice passou de 0,2232 em 1992 para 0,5236 em 2023, um aumento de 134,6% no período. Esse crescimento contínuo indica expansão gradual da cobertura vegetal. Em termos sazonais, os meses de junho (0,3931) e julho (0,3908) apresentaram as maiores médias de NDVI, enquanto setembro teve a menor (0,3446). A variância mensal também foi mais alta em junho (0,010062) e fevereiro (0,009529), sugerindo maior oscilação nesses meses, ao passo que dezembro apresentou variância mínima (0,005524). Esses números confirmam que a vegetação tem aumentado mesmo em períodos de estiagem, o que reforça a evidência de *greening* no sistema dunar.

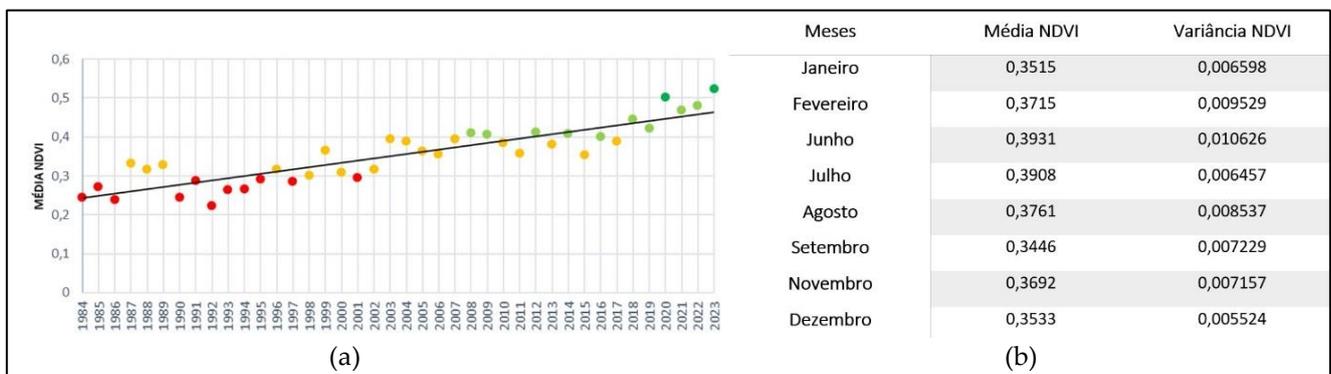


Figura 4. (a) Variação da Média Anual do NDVI no Período de 1984 a 2023; (b) Estatísticas do NDVI por Mês. Elaborado pelos autores.

4.2. Variação sazonal do NDVI

Embora seja evidente o aumento do NDVI ao longo do período analisado, é relevante considerar a influência das variações sazonais ao longo do ano. As figuras 5A e 5B permitem observar que os padrões mensais de NDVI podem ser entendidos como reflexo da sazonalidade climática local. Os meses entre junho e setembro foram representados pelo gráfico para os meses secos (Figura 5A), enquanto os meses entre novembro e fevereiro estiveram relacionado aos meses chuvosos (Figura 5B).

Entre os meses secos, junho de 2023 registrou o valor de NDVI mais alto de toda a série histórica, acompanhado do maior aumento interanual; já setembro registrou o menor valor (no caso de 1992) e menor incremento proporcional. Nos meses chuvosos, os valores médios de NDVI foram geralmente mais elevados do que nos meses secos, indicando maior cobertura vegetal em consequência das chuvas. Destacam-se janeiro e dezembro com maiores índices, em contraste com novembro e fevereiro que apresentaram crescimento vegetativo mais homogêneo. A análise das linhas de tendência ao longo do tempo mostra que o NDVI cresceu em todas as épocas do ano, com maiores avanços nos meses de junho e julho. Isso indica que a vegetação tem se expandido inclusive nos períodos menos favoráveis (seca), devido à possível ação colonizadora contínua de espécies e invasoras e à tendência de diminuição mais acentuada da intensidade eólica local no período úmido (Figura 6), conforme apresentado por Pereira (2025) através de dados da plataforma *TerraClimate*.

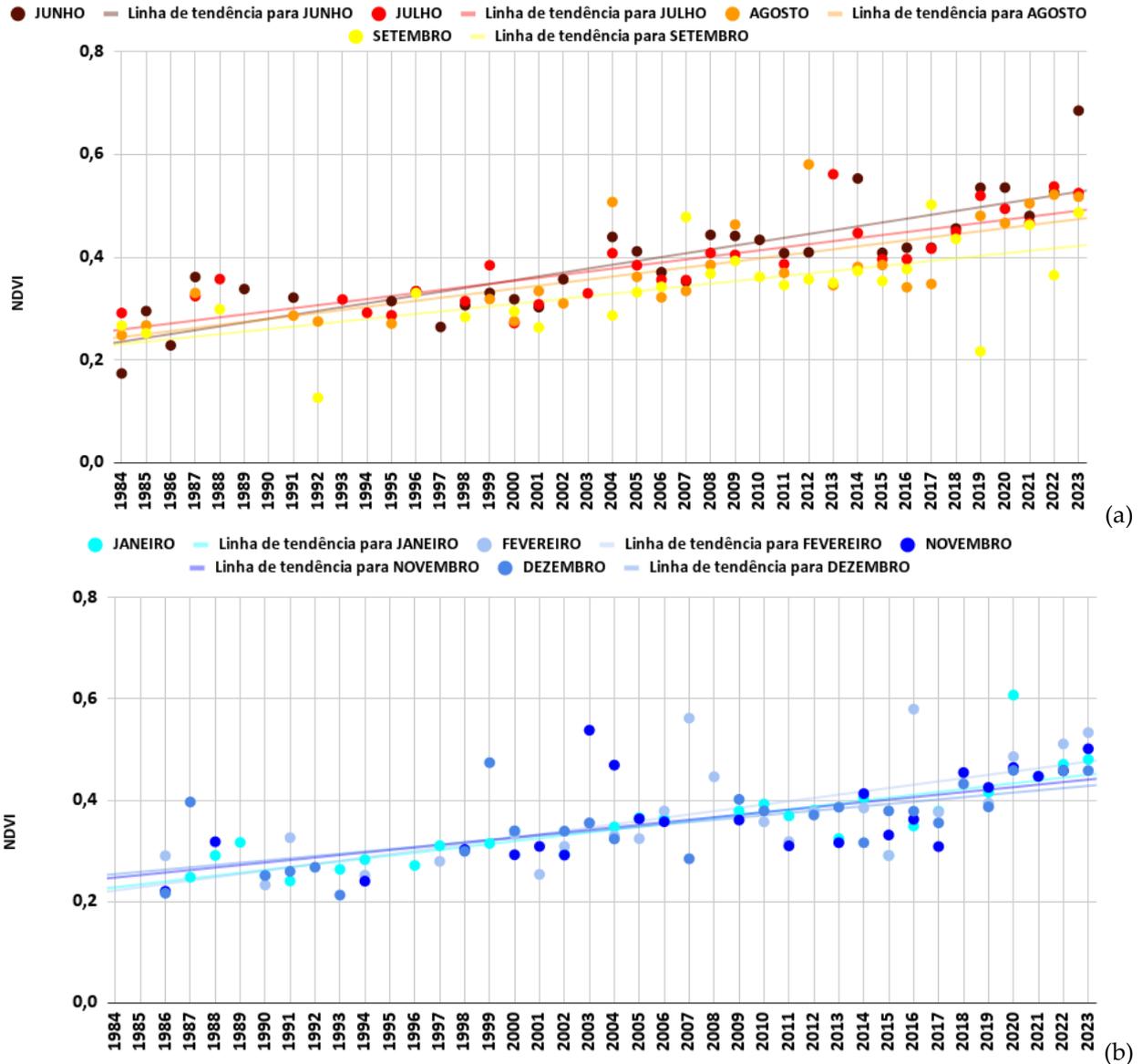


Figura 5. (a) Variação do NDVI entre 1984 e 2023 para os meses secos; (b) Variação do NDVI entre 1984 e 2023 para os meses chuvosos. Elaborado pelos autores.

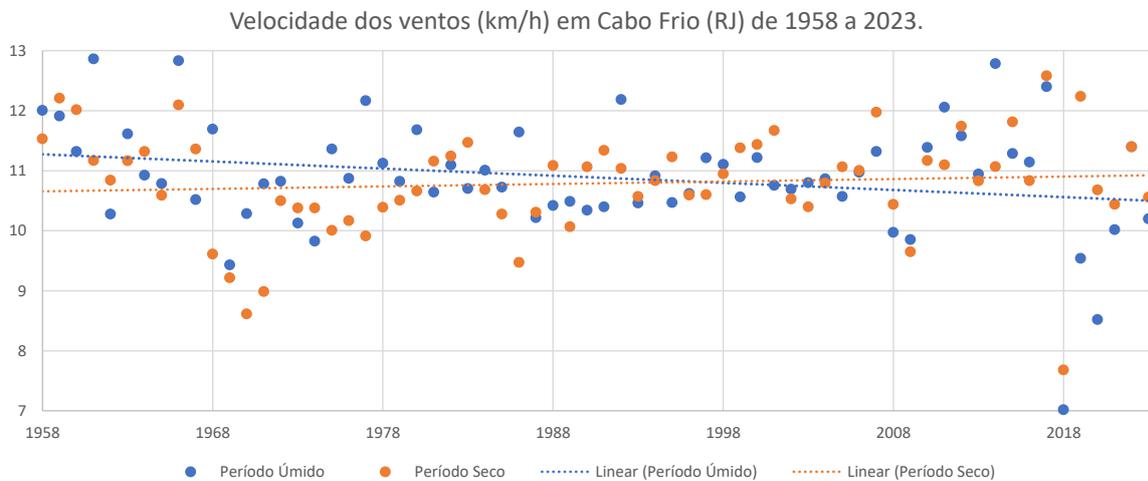


Figura 6. Série temporal das médias da velocidade dos ventos (km/h) nos períodos úmido e seco de Cabo Frio dos anos de 1958 a 2023. Elaborado por Pereira (2025).

De um modo geral, entre 1980 e 1990, os valores do NDVI permaneceram relativamente baixos, progredindo à medida que também cresceu o número de meses com dados disponíveis. Nos anos mais recentes, os pontos indicam que a variabilidade entre meses secos e chuvosos diminuiu. Após o ano 2000, percebe-se maior amplitude na variação interanual, ligada a eventos climáticos globais como *El Niño* e *La Niña*, que influenciam diretamente a disponibilidade hídrica em diversas regiões. Entre 2015 e 2020, os valores de NDVI se destacam por serem mais elevados, sugerindo condições ambientais mais favoráveis ou uma resposta positiva da vegetação às mudanças.

4.3. Sazonalidades climáticas produzidas por *El Niño* e *La Niña*

A figura 7 apresenta a série temporal do Índice Oceânico Niño (ONI), disponibilizado pela NOAA, onde foram analisadas para investigar influências climáticas de larga escala. Identificaram-se ciclos irregulares de *El Niño* (valores positivos) e *La Niña* (valores negativos) entre 1950 e 2023. Destacam-se eventos intensos de *El Niño* em 1982–83, 1997–98 e 2015–16, e de *La Niña* em 1973–74, 1999–2000 e 2010–11. Essa variabilidade climática se reflete na série de NDVI, com oscilações interanuais acentuadas especialmente após o ano 2000, quando episódios de *El Niño* (2009–2010; 2015–2016) e de *La Niña* (2007–2008; 2010–2011; 2011–2012; 2020–2021) ocorreram em sucessão, chegando em índices considerados fortes a muito fortes.

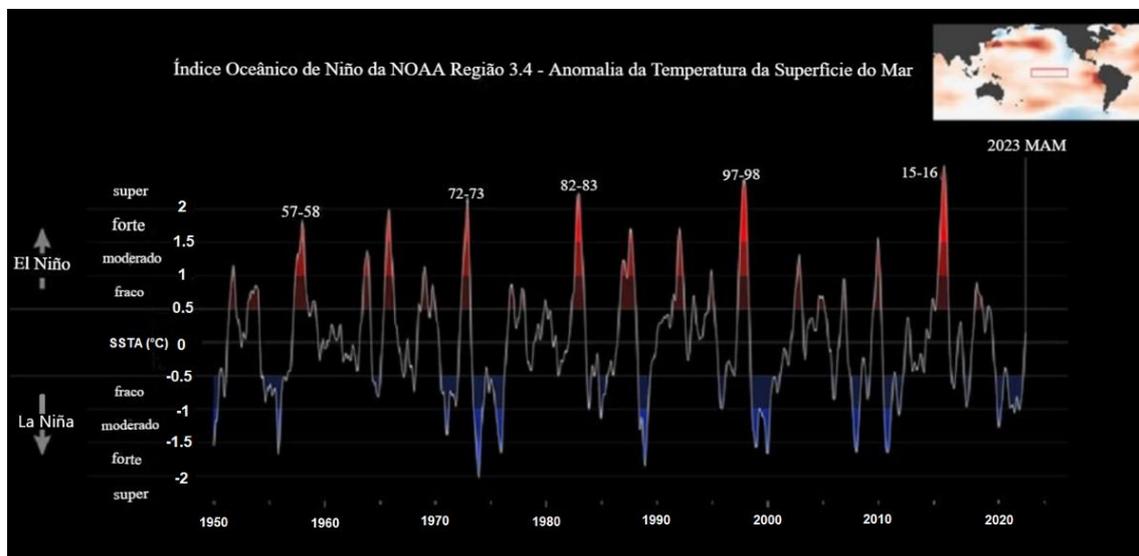
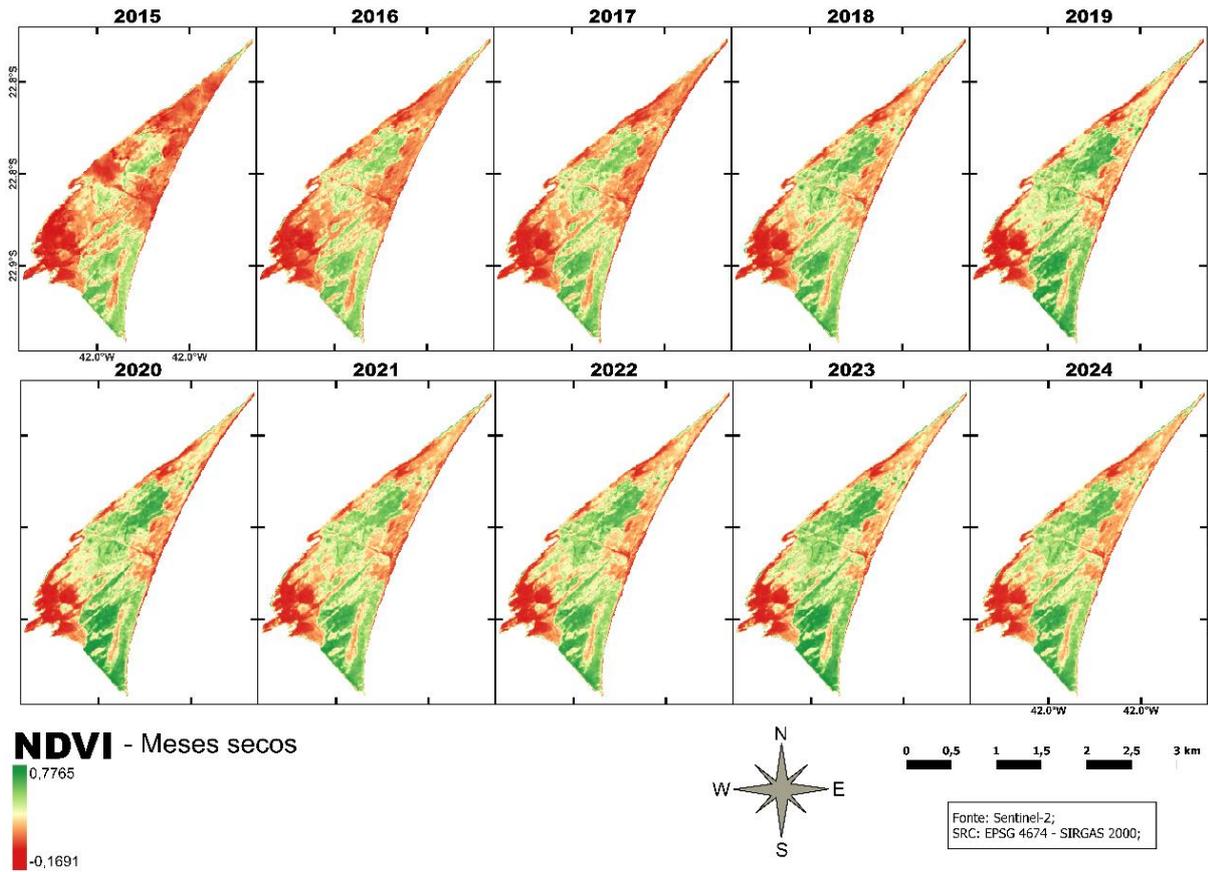


Figura 7. Variação do *El Niño* e da *La Niña* de 1950 a 2023. Traduzido de NASA (2023).

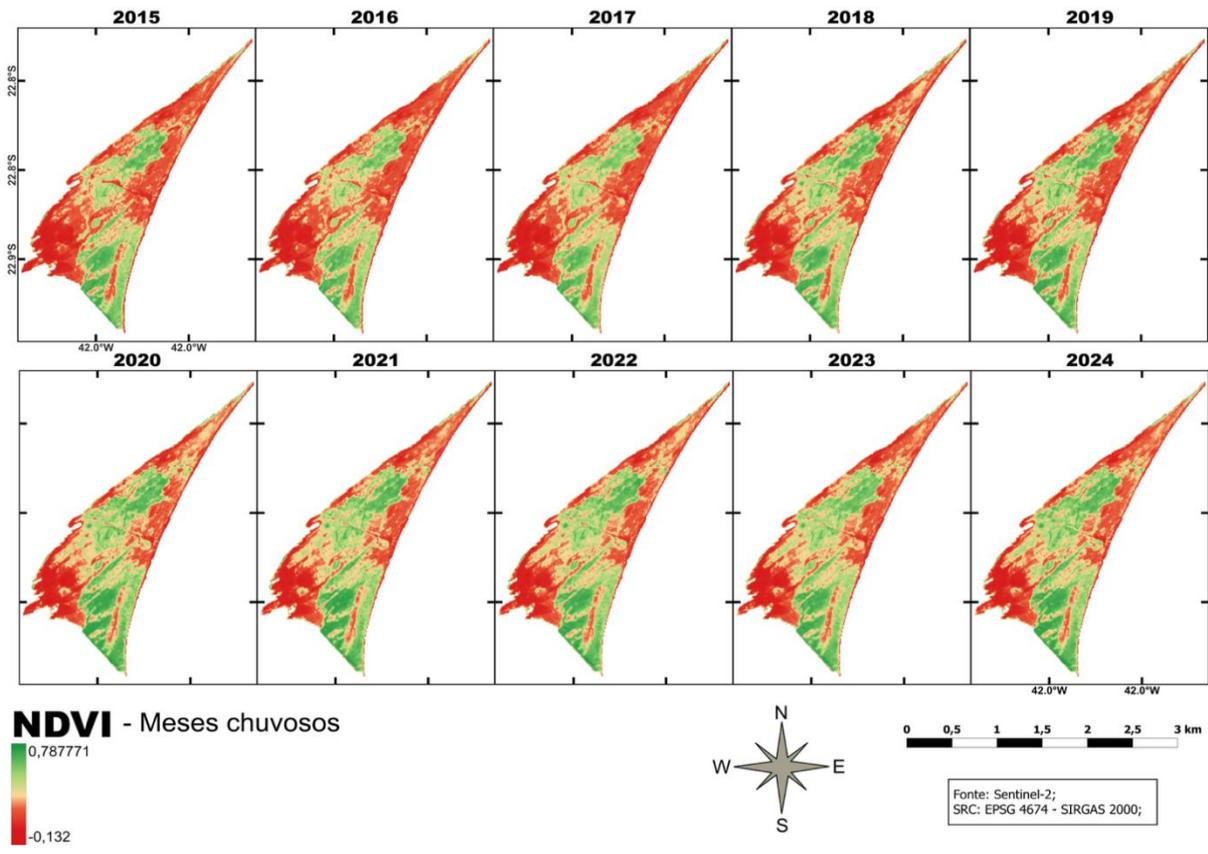
4.4. Distribuição espacial da vegetação (Sentinel-2 2015-2024)

A partir das imagens extraídas do Sentinel-2, entre 2015 e 2024, a distribuição do NDVI sobre as dunas do Perú revela importantes aspectos sobre a dinâmica da vegetação na região. Os mapas (Figuras 8A e 8B) mostram que nesse período, os valores de NDVI oscilaram de 0,17 a 0,78 nos meses secos, e de 0,13 a 0,79 nos meses chuvosos, indicando maior amplitude nas estações úmidas. Em ambos os cenários sazonais, as menores concentrações de vegetação (menor NDVI) ocorreram no setor sudoeste do campo de dunas, sugerindo áreas de maior mobilidade arenosa. Já os maiores índices foram observados nas porções central e sul da região, onde a cobertura vegetal se ampliou mais intensamente. Esses padrões espaciais destacam localidades com diferentes graus de estabilização, e, por sua vez, de morfodinâmica.

Adicionalmente, a comparação entre os períodos secos e chuvosos revela que, apesar da sazonalidade influenciar a intensidade dos índices, os padrões espaciais de maior ou menor densidade de vegetação mantêm certa consistência. Isso sugere que núcleos vegetados mais densos permanecem relativamente estáveis mesmo na estação seca, em razão do próprio adensamento/maturação da cobertura e de condicionantes microambientais (maior rugosidade/sombreamento eólico, retenção hídrica local), em coerência com a dominância de espécies tolerantes e/ou exóticas nas porções com maiores valores encontrados.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Distribuição espacial do NDVI entre 2015 e 2024 no campo de dunas do Perú durante os meses secos; (b) Distribuição espacial do NDVI entre 2015 e 2024 no campo de dunas do Perú durante os meses chuvosos. Elaborado pelos autores.

4.5. Análise Espacial Detalhada (MDE e ortofotomosaico de 2024)

A análise em alta resolução, por meio de ortofotomosaico e MDE obtidos com ARP, fornece detalhes da expansão da vegetação e de fatores locais. Imagens das áreas com vegetação em falsa cor (Figura 9) evidenciam aglomerados densos de Casuarinas, espécie exótica altamente adaptada (exemplos 9A e 9E). Em outras porções (exemplos 9B e 9F) são visíveis trilhas abertas por veículos e pessoas, indicando remoção de vegetação e retorno parcial de sedimentos eólicos. As imagens ampliadas (9C, 9G) mostram gramíneas e herbáceas avançando sobre dunas maiores, aproximando-se das feições eólicas principais do campo. Finalmente, os recortes 9D e 9H destacam a expansão de vegetação na face sotavento de dunas parabólicas centrais. Em resumo, a cobertura vegetal cresce em praticamente toda a área, com destaque para formação de manchas florestais (Casuarina), trilhas de interferência humana e estabilização progressiva das dunas menores.

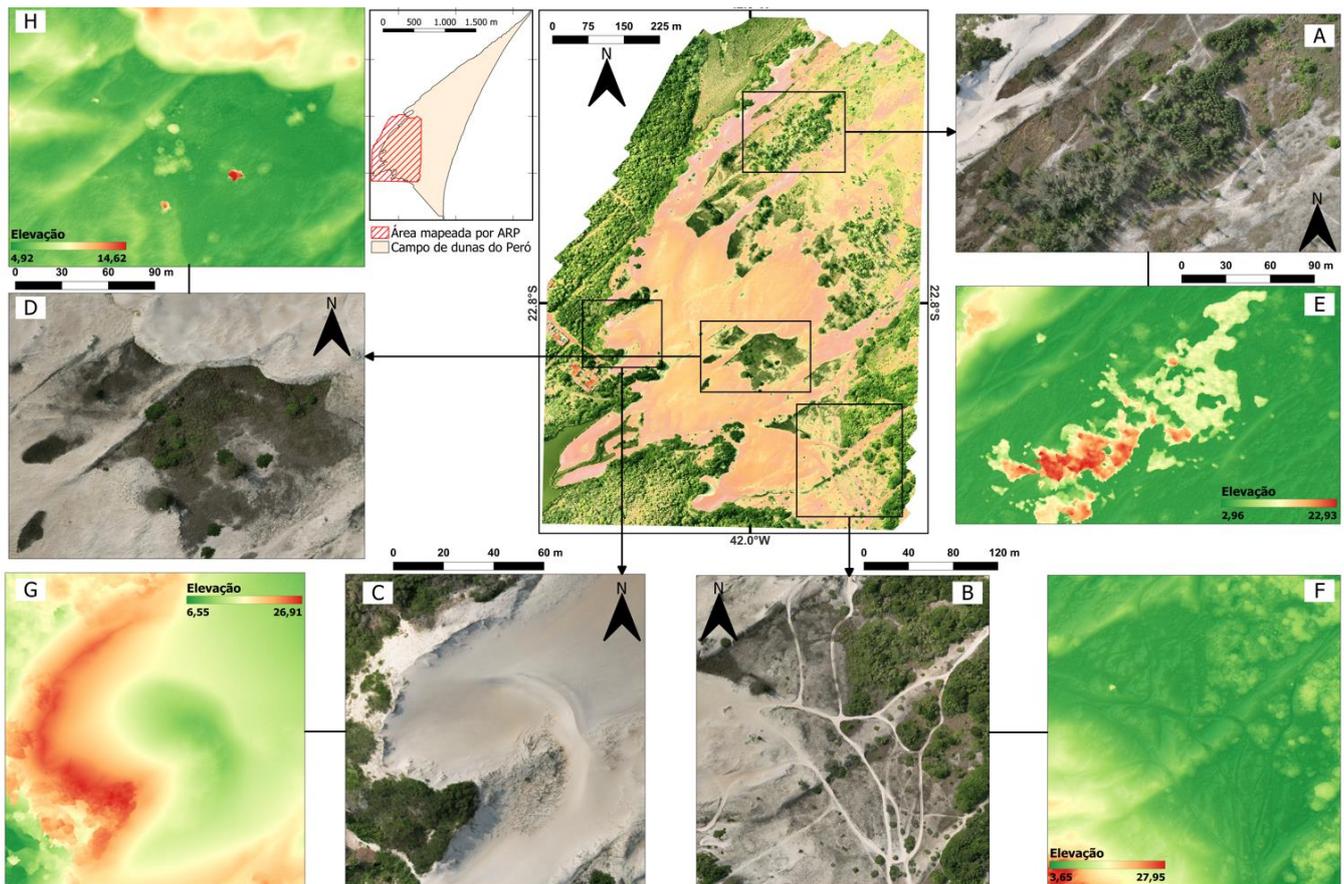


Figura 9. Painel Central: ortofotomosaico com MDE em falsa-cor da área mapeada no setor centro-sul do campo de dunas do Perú; os retângulos pretos delimitam as janelas A-H. Painéis A-D (ortofotomosaicos, cor natural): (A) adensamento de floresta de casuarinas; (B) de reativações eólicas associadas a trilhas; (C) avanço de gramíneas/herbáceas sobre feições dunares maiores; (D) expansão de vegetação nas faces de sotavento de dunas parabólicas. Painéis E-H (MDE em falsa-cor por variação altimétrica): (E) floresta de casuarinas; (F) reativações eólicas por trilhas; (G) avanço da vegetação rasteira sobre feições dunares; (H) expansão da vegetação em faces de sotavento de dunas parabólicas. Elaborado pelos autores.

5. Discussão

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam um processo contínuo e crescente de expansão da cobertura vegetal no campo de dunas do Perú, sinalizado por um aumento significativo do NDVI entre 1984 e 2023, especialmente a partir dos anos 2000. Esse padrão reflete uma dinâmica que tem sido amplamente descrita na literatura internacional como *greening*: a substituição de superfícies arenosas por vegetação permanente, provocando alterações funcionais nos sistemas dunares (Jackson et al., 2019; Petrova et al., 2023). A presença de altos valores de NDVI mesmo em meses historicamente secos, como junho e julho, indica uma modificação no

regime de sazonalidade da cobertura vegetal, revelando maior resiliência da vegetação local frente à variabilidade hídrica.

Esse avanço da vegetação deve ser compreendido como resultado de múltiplos vetores. Por um lado, a atuação de eventos climáticos de médio termo, como *El Niño* e *La Niña*, influencia diretamente os regimes de precipitação e vento na região Sudeste brasileira, condicionando o grau de mobilidade ou fixação das dunas (Da Silva e Hesp, 2013). Por outro, os dados de NDVI e as imagens de alta resolução obtidas com ARP revelam interferências antrópicas locais, como trilhas, intervenções causadas por tentativas de implementação de projetos imobiliários, conforme documentados por Saleme (2016), que afetam a morfodinâmica do campo dunar, criando microambientes propícios ao estabelecimento e à disseminação de vegetação. A literatura indica que, quando não acompanhados de estratégias de manejo adequadas, essas intervenções podem intensificar a estabilização das dunas, levando à descaracterização de feições e à perda de biodiversidade (Tribe e Kennedy, 2010; Gao et al., 2024).

A expansão da vegetação sobre áreas antes dominadas por sedimentos livres pode afetar profundamente a dinâmica eólica local. Dunas parabólicas, barcanas e barcanoides, como havia em abundância nesta planície (ver Muehe et al., 2010), dependem da interação contínua entre aporte sedimentar, ação do vento e presença controlada de vegetação. Quando há um adensamento excessivo da cobertura vegetal, especialmente nas faces de sotavento de feições em meio a planície de deflação (como evidenciado nas figuras 8D e 8H) o sistema tende à estagnação morfológica (Hesp, 2013). Isso compromete a remobilização interna de sedimentos, fragiliza o suprimento para outras feições mais interiores, alterando funcionamento sistêmico do campo dunar. Segundo Yizhag et al. (2013), feições menores tendem a estabilizar-se mais rapidamente, enquanto dunas maiores demandam maior aporte e maior tempo de resposta à cobertura vegetal, o que foi corroborado pela análise tridimensional da megaforma do Perú (Figura 8C e 8G).

O comportamento diferencial do NDVI ao longo do tempo, especialmente sua redução nas diferenças sazonais entre períodos secos e chuvosos, sugere não apenas uma ampliação da vegetação, mas também uma homogeneização funcional do ecossistema. Essa perda de variabilidade temporal pode representar um risco à resiliência ecológica do sistema dunar, já que sua capacidade de adaptação frente a eventos extremos (tempestades e ressacas do mar) e à elevação do nível do mar, depende da alternância entre fases de mobilidade e estabilização (Carter, 1991; Elmquist et al., 2003). Entende-se que ao reduzir a mobilidade, o *greening* impede o recuo natural das dunas frente ao avanço do mar, vulnerabilizando o sistema à erosão e à fragmentação funcional.

O caso do Perú também ilustra como elementos antrópicos locais operam em sinergia com processos atmosféricos regionais e mudanças climáticas globais, promovendo modificações na paisagem que, à primeira vista, podem ser interpretadas como “recuperação” ambiental (devido ao aumento da biomassa) mas que, na verdade, denunciam um desequilíbrio funcional. Como discutem Marzalletti et al. (2019) e Petrova et al. (2023), o uso do NDVI deve ser contextualizado: o crescimento da vegetação não implica necessariamente em regeneração ecológica, mas pode refletir a expansão de formas vegetais homogeneizadas e ecologicamente disruptivas, que rompem o fluxo eólico/sedimentar, cessando a conectividade do sistema que envolve a praia, dunas primárias (frontais) e dunas secundárias (internas). A substituição de espécies nativas adaptadas à mobilidade dunar por exóticas invasoras tolerantes e de rápido crescimento compromete a integridade estrutural, a diversidade florística, a geodiversidade costeira e os serviços ecossistêmicos associados aos campos de dunas.

A presença de espécies exóticas e resistentes como a casuarina, por exemplo, é reconhecidamente associada à estabilização acelerada de dunas em diferentes regiões costeiras (Garzo et al., 2025) e está diretamente relacionada à antropização no entorno de áreas naturais com sistemas dunares (Bohrer et al., 2009). A análise das figuras 8A e 8E revelou o adensamento expressivo dessa espécie no campo de dunas do Perú, onde sua rápida dispersão tem sido favorecida por janelas úmidas mais prolongadas e menor energia eólica para o transporte abrasivo de sedimentos. Essa expansão, no entanto, não se limita ao Perú: a Casuarina tem se espalhado por outros sistemas eólicos das Baixadas Litorâneas, como os campos da Massambaba e o complexo da Duna Dama Branca, formando manchas florestais densas que interrompem o fluxo sedimentar natural vindo da praia. Ao alterar o transporte eólico e promover a fixação excessiva dos sedimentos, essa espécie compromete a dinâmica morfológica das dunas à sotavento, suprimindo espécies nativas adaptadas à mobilidade arenosa e reduzindo a variabilidade ecológica do ambiente. Tal cenário têm levantado preocupações quanto à descaracterização fisiológica desses ambientes e à redução da biodiversidade local (CDB, 1992; Feagin et al., 2010).

6. Conclusões

No campo de dunas do Perú, a intensificação do fenômeno do *greening*, observada por meio do aumento contínuo do NDVI desde os anos 1980, reflete alterações significativas nos padrões de vegetação induzidas por fatores climáticos e intervenções humanas. Esse processo, que vem sendo documentado em diversos sistemas costeiros ao redor do mundo, manifesta-se localmente pela expansão de vegetação sobre áreas de sedimentos livres impulsionada por interferências antrópicas como a dispersão da *Casuarina equisetifolia* L em meio à planície de deflação.

A análise detalhada da sazonalidade do NDVI, somada à avaliação de imagens de alta resolução, permitiu identificar padrões espaciais e morfológicos que apontam para a perda de funcionalidade do sistema dunar. Em especial, destaca-se o papel de espécies exóticas invasoras e das alterações antrópicas na paisagem como vetores críticos para a modificação da dinâmica eólica e sedimentar.

A singularidade desse ambiente costeiro exige abordagens específicas de gestão que integrem conhecimento geomorfológico, ecológico e climático. Os resultados aqui obtidos reforçam a necessidade de interpretações mais críticas sobre os indicadores espectrais e os padrões de vegetação observados por sensoriamento remoto. O avanço do *greening* no campo de dunas do Perú, exprime um processo multicausal e deve ser interpretado como um sintoma de alterações ambientais profundas, indicando mudança de regime: de campos móveis para estabilização antropicamente amplificada. Esse estado é sustentado por um laço de retroalimentação positiva composto por: adensamento vegetal (inclusive exóticas); aumento da rugosidade e sombreamento eólico; redução do transporte efetivo de areia; e novo adensamento, condicionado por janelas úmidas mais prolongadas e episódios de menor energia eólica.

A integração de análises espaciais detalhadas, observação de campo e indicadores climáticos globais pode oferecer uma base metodológica robusta para o monitoramento e a gestão desses ambientes. Nesse sentido, como hipótese final, propõe-se que o campo de dunas do Perú encontra-se em uma fase de transição funcional, na qual o equilíbrio entre mobilidade e estabilização está sendo desconfigurado, exigindo políticas e gerenciamento ambiental específico de conservação para evitar a descaracterização definitiva do sistema.

Financiamento: esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) com concessão de bolsa e diárias de campo; e pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), por meio do Auxílio Básico à Pesquisa (APQ1), Proc. E-26/210.422/2024

Agradecimentos: os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo suporte institucional e aos membros do Núcleo de Estudos Costeiros (NECost/UERJ) que participaram das campanhas de campo e do processamento de dados. Agradecem, ainda, o apoio técnico-administrativo das equipes envolvidas e as contribuições dos editores e pareceristas anônimos, que enriqueceram este trabalho.

Conflito de interesses: os autores declaram não ter conflito de interesses.

Referências

1. ARAUJO, D. S. D. **Cabo Frio Region. Centres of Plant Diversity: a guide and strategy for their conservation:** The Americas. In: DAVIS, S. D. H.; HERRERA-MACBRYDE, O.; VILLA-LOBOS, J.; HAMILTON, A. C. (Eds.). Oxford: WWF/IUCN, 1997. p. 373-375.
2. BAAS, A. C. W.; NIELD, J. M. Modelling vegetated dune landscapes. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L06405, 2007.
3. BARBIÉRI, E. B. Cabo Frio e Iguaba Grande: dois microclimas distintos a um curto intervalo espacial. In: LACERDA, L. D.; ARAÚJO, D. S. D.; CERQUEIRA, R.; TURQ, B. (Eds.). **Restingas: origem, estruturas, processos**. Niterói: CEUFF, 1984.
4. BARBIÉRI, E. B. Condições climáticas dominantes na porção oriental da Lagoa de Araruama (RJ) e suas implicações na diversidade do teor de salinidade. **Cadernos Ciências da Terra**, v. 59, p. 3-34, 1985.

5. BARBIÉRI, E.; COE NETO, R. Spatial and temporal variation of rainfall of the East Fluminense Coast and Atlantic Serra do Mar, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: KNOPPERS, B.; BIDONE, E. D.; ABRÃO, J. J. (Eds.). **Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil. Série Geoquímica Ambiental**, n. 6, p. 47-56, 1999.
6. BRASIL. **Decreto nº 89817, de 20 de junho de 1984**. Dispõe Sobre As Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 22 jun. 1984.
7. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Convenção sobre Diversidade Biológica**. Brasília: MMA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biodiversidade1/convencao-sobre-diversidade-biologica>. Acesso em: 15 jun. 2025.
8. BOHRER, C. B. A.; DANTAS, H. G. R.; CRONEMBERGER, F. M.; VICENS, R.; ANDRADE, S. F. Mapeamento da vegetação e do uso do solo no Centro de Diversidade Vegetal de Cabo Frio, RJ, Brasil. **Rodriguésia**, v. 60, p. 1-23, 2009.
9. BRUNBJERG, A. K.; SVENNING, J. C.; EJRNSAES, R. Experimental evidence for disturbance as key to the conservation of dune grassland. **Biological Conservation**, v. 174, p. 101–110, 2014.
10. BRUNBJERG, A. K.; JØRGENSEN, G. P.; NIESEN, K. M.; PEDERSEN, M. L.; EJRNSAES, R. Disturbance in dry coastal dunes in Denmark promotes diversity of plants and arthropods. **Biological Conservation**, v. 182, p. 243–253, ISSN 0006-3207. 2015. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.12.013.
11. CARTER, R. W. G. Coastal dunes. In: CARTER, R. W. G. (Org.). **Coastal environments**. Academic Press, 1988. p. 301-333.
12. CARTER, R. Near-future sea level impacts on coastal dune landscapes. **Landscape Ecology**, v. 6, n. 1, p. 29–39, 1991.
13. CASTRO, J. W. A.; ANTONELLO, L. L.; GONÇALVES, R. A. Dunas costeiras obliquas do município de Cabo Frio / RJ - Brasil. **Ciências da Terra**, Monte Caparica - Portugal, v. 5, p. 26-29, 2003.
14. COE, H. H. G.; CARVALHO, C. N. de; SOUZA, L. O. F.; SOARES, A. Peculiaridades ecológicas da região de Cabo Frio, RJ. **Revista Tamoios (Online)**, julho, p. 1-20, 2007.
15. COE, H. H. G.; CARVALHO, C. N. de. Cabo Frio - um enclave semiárido no litoral úmido do estado do Rio de Janeiro: respostas do clima atual e da vegetação pretérita. **Geosp - Espaço e Tempo**, v. 33, p. 136-151, 2013.
16. DA SILVA, G. M.; HESP, P. A. Increasing rainfall, decreasing winds, and historical changes in Santa Catarina dunefields, southern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, p. 1036-1045, 2013.
17. DA SILVEIRA, I. R. L.; CASTRO, J. W. A.; FERNANDES, D.; CABRAL, C. L.; JUNIOR, W. G.; DE OLIVEIRA, D. M. V. Dinâmica das dunas escalonares transgressivas sobre a região do Peró - Cabo Frio, Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, p. 986-1000, 2021.
18. ELMQVIST, T.; FOLKE, C.; NYSTRÖM, M.; PETERSON, G.; BENGTSSON, J.; WALKER, B.; NORBERG, J. Response diversity, ecosystem change, and resilience. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 1, p. 488–494, 2003.
19. FEAGIN, R.; MUKHERJEE, N.; SHANKER, K.; BAIRD, A.; CINNER, J.; KERR, A.; KOEDAM, N.; SRIDHAR, A.; ARTHUR, R.; LOKU PULUKKUTTIGE, J.; LO SEEN, D.; MENON, M.; RODRIGUEZ, S.; SHAMSUDDOHA, M.; DAHDOUH-GUEBAS, F. Shelter from the storm? Use and misuse of coastal vegetation bioshields for managing natural disasters. In: **Conservation Letters**, Oxford: Wiley-Blackwell, v. 3, n. 1, p. 1–11, 2010.

20. FERNANDEZ, G. B.; PEREIRA, T. G.; ROCHA, T. B.; MALUF, V.; MOULTON, M.; OLIVEIRA FILHO, S. R. Classificação morfológica das dunas costeiras entre o cabo Frio e o cabo Búzios, litoral do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, p. 595-622, 2017.
21. FERNANDEZ, G. B. et al. Morfodinâmica costeira do litoral fluminense: 15 anos de observação contínua. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. (orgs.) **Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 196-226. ISBN 978-65-992571-0-0.
22. FREITAS, I. M.; BOHRER, C. B. A.; OLIVEIRA, J. L. F. O clima do município de Iguaba Grande (RJ): características, vegetação natural e agricultura. In: **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 11., 2005, São Paulo. Anais. São Paulo: USP, 2005. p. 3384-3392.
23. GARZO, P. A.; DARDON, J. R.; ISLA, F. I.; Touristic urbanization and greening of coastal dune fields: A long-term assessment of a temperate sandy barrier of Argentina. **Journal Of Geographical Sciences**; Science Press. 35. p. 206-230, 2025. DOI: 10.1007/s11442-025-2319-2.
24. GAO, J.; KENNEDY, D. M.; KONLECHNER, T. M. Coastal dune mobility over the past century: A global review. **Progress in Physical Geography**, v. 44, p. 814–836, 2020.
25. GAO, J.; KENNEDY, D. M.; KONLECHNER, T. M.; McSWEENEY, S.; CHIARADIA, A.; McGUIRK, M. Changes in the vegetation cover of transgressive dune fields: A case study in Cape Woolamai, Victoria. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 47, n. 3, p. 778-792, 2022.
26. GAO, J.; KENNEDY, D. M.; McSWEENEY, S. Patterns of vegetation expansion during dune stabilization at the decadal scale. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 48, n. 15, p. 3059-3073, 2023.
27. GAO, J.; KENNEDY, D. M.; McSWEENEY, S. Decadal changes in vegetation cover within coastal dunes at the regional scale in Victoria, SE Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 351, 2024.
28. GRIMM, A. M. The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263–280, 2003. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2.
29. GUIADO-PINTADO, E.; JACKSON, D. W. T.; ROGERS, D. 3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone. **Geomorphology**, v. 328, p. 157–172, 2019.
30. HEILBRON, M.; MOHRIAK, W. U.; VALERIANO, C. M.; MILANI, E. J.; ALMEIDA, J. C.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the southeastern continental margin of Brazil. In: MOHRIAK, W.; MANIK, T. (Eds.). **Atlantic rifts and continental margins**. Geophysical Monograph, vol. 115. American Geophysical Union, Washington, D.C., 2000, p. 1–32.
31. HESP, P. A. Surfzone, beach, and foredune interactions on the Australian southeast coast. **Journal of Coastal Research**, p. 15-25, 1988.
32. HESP, P. A. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. **Geomorphology**, v. 48, p. 245–268, 2002.
33. HESP, P. A. Conceptual models of the evolution of transgressive dune field systems. **Geomorphology**, v. 199, p. 138-149, 2013.
34. JACKSON, D. W. T.; COSTAS, S.; GONZÁLEZ-VILLANUEVA, R.; COOPER, A. A global 'greening' of coastal dunes: An integrated consequence of climate change? **Global and Planetary Change**, v. 182, 2019.
35. KONLECHNER, T.; RYU, W.; HILTON, M.; et al. Evolution of foredune texture following dynamic restoration, Doughboy Bay, Stewart Island, New Zealand. **Aeolian Research**, v. 19, p. 203–214, 2015.
36. LOPEZ, A. C. B.; HESP, P. A. Evolution of a coastal transgressive dunefield to a parabolic dunefield, Canunda dunes, South Australia. **Geomorphology**, v. 430, 108653, 2023.

37. LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R. et al. The State of the World's Beaches. **Scientific Reports**, v. 8, p. 6641, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6.
38. LUNA, M. C. M. M.; PARTELLI, E. J. R.; DURÁN, O.; HERRMANN, H. J. Model for the genesis of coastal dune fields with vegetation. **Geomorphology**, v. 129, p. 215-224, 2011.
39. MANSUR, K. L.; CARVALHO, I. S. Characterization and valuation of the geological heritage identified in the Peró dune field, State of Rio de Janeiro, Brazil. **Geoheritage**, v. 3, p. 97-115, 2011.
40. MARTIN, L.; SUGUIO, K. Excursion route along the Brazilian coast between Santos (State of São Paulo) and Campos (State of Rio de Janeiro). **Special Publication nº 2 for International Symposium on Global Changes in South America during the Quaternary**. São Paulo, 1989. 136 p.
41. MARZIALETTI, F.; GIULIO, S.; MALAVASI, M.; SPREERANDII, M.G.; ACOSTA, A.T.R.; CARANZZA, M.L. Capturing Coastal Dune Natural Vegetation Types Using a Phenology-Based Mapping Approach: The Potential of Sentinel-2. **Remote Sens**. 2019, 11, 1506. DOI: 10.3390/rs11121506.
42. MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, 2011.
43. MOONEY, H. A.; BULLOCK, S. H.; MEDINA, E. Introduction. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (Eds.). **Seasonally dry tropical forests**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, p. 1-8.
44. MOULTON, M. A.; HESP, P. A.; MIOT DA SILVA, G.; BOUCHEZ, C.; LAVY, M.; FERNANDEZ, G. B. Changes in vegetation cover on the Younghusband Peninsula transgressive dunefields (Australia) 1949–2017. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 44, n. 2, p. 459–470, 2018.
45. MUEHE, D.; VALENTINI, E. **O litoral do estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental**. Rio de Janeiro: Ed. FEMAR, 1998. 99 p.
46. 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 of the Peró coastal plain – Cabo Frio, Rio de Janeiro state, Brazil. **Pan American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 267-276, 2010.
47. NASA – National Aeronautics and Space Administration. **The Oceanic Niño Index**. 23 jun. 2023. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/30847/>. Acesso em: 10 jun. 2025.
48. PEREIRA, M.M.R. Análise das transformações morfológicas e ambientais em sistemas dunares no município de Cabo Frio, RJ. 2025. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. 2025. 93p.
49. PEREIRA, T. G.; OLIVEIRA FILHO, S. R.; CORREA, W. B.; FERNANDEZ, G. B. Diversidade dunar entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios RJ. **Revista de Geografia**, Recife, v. 2, p. 15-29, 2010.
50. PETROVA, P. G.; DE JONG, S. M.; RUESSINK, G. A global remote-sensing assessment of the intersite variability in the *greening* of coastal dunes. **Remote Sensing**, v. 15, p. 1491, 2023.
51. PROVOOST, S.; JONES, M. L. M.; EDMONDSON, S. E. Changes in landscape and vegetation of coastal dunes in northwest Europe: a review. **Journal of Coastal Conservation**, v. 15, p. 207-226, 2011.
52. RAMOS, M. S.; FARINA, L.; FARIA, S. H.; LI, C. Relationships between large-scale climate modes and the South Atlantic Ocean wave climate. **Progress in Oceanography**, v. 197, 102660, 2021. DOI: 10.1016/j.pocean.2021.102660.
53. SALEME, F. **Interpretação ambiental, aspectos biológicos e educacionais do Parque Estadual da Costa do Sol e da Área de Proteção Ambiental do Pau-Brasil nos limites do município de Cabo Frio**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Biodiversidade em Unidades de Conservação) – Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

54. SHIMABUKURO, Y. E. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 1729-1737, 1998.
55. SHORT, A. D.; HESP, P. A. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. **Marine Geology**, v. 48, n. 3-4, p. 259-284, 1982.
56. TEDESCHI, R. G.; CAVALCANTI, I. F. A.; GRIMM, A. M. Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 13, p. 4797-4814, 2016.
57. TRIBE, H. M.; KENNEDY, D. M. The geomorphology and evolution of a large barrier spit: Farewell Spit, New Zealand. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, p. 1751-1762, 2010.
58. YIZHAQ, H.; ASHKENAZY, Y.; LEVIN, N.; TSOAR, H. Spatiotemporal model for the progression of transgressive dunes. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 392, n. 19, p. 4502-4515, 2013.



Esta 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.