

Capítulo IV

ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS DUNAS MÓVEIS DA PRAIA DO CASSINO (RS-BRASIL) ENTRE 1990 E 2020 COM O USO DE DADOS DOS SENSORES TM-OLI DA SÉRIE LANDSAT





ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS DUNAS MÓVEIS DA PRAIA DO CASSINO (RS-BRASIL) ENTRE 1990 E 2020 COM O USO DE DADOS DOS SENSORES TM-OLI DA SÉRIE LANDSAT

Jean Marcel de Almeida Espinoza¹; Miguel da Guia Albuquerque²; Deivid Cristian Leal-Alves³; Bento Almeida Gonzaga⁴; Tatiana de Almeida Espinoza⁴

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Campus Caçador, Avenida Fahdo Thomé, 3000, Caçador - SC, Brasil, CEP: 89.500-000. jean.espinoza@ifsc.edu.br (autor correspondente)

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Rio Grande, Rua Engenheiro Alfredo Huch, 475, Rio Grande-RS, Brasil, CEP: 96.201-460. miguel.albuquerque@riogrande.ifrs.edu.br

³Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Campus Carreiros, Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF) - Av. Itália, km 8, Rio Grande - RS, Brasil, CEP: 96.203-900. dclealalves@gmail.com

⁴SENAI-SC, Unidade Florianópolis – Rodovia SC-401, nº 3730 – bairro Saco Grande, Florianópolis – SC, Brasil, CEP: 88.032-005. profbentoag@gmail.com; tespinoza273@gmail.com

RESUMO

A perda de área de dunas móveis é consequência da ocupação humana e, principalmente, supressão da cobertura vegetal ocasionadas pela retirada de areia para uso como insumo na construção civil, servindo como material para terraplanagem, e inserção de espécies exóticas. O presente trabalho teve como objetivo determinar a variação da cobertura dunar ao longo de um trecho de 42 km na Praia do Cassino, Rio Grande (RS-Brasil) entre os anos de 1990 e 2020. Para isso, foram obtidas imagens dos sensores TM/LANDSAT-5 e OLI/LANDSAT-8 dos anos de 1990, 2000, 2010 e 2020. Com o conjunto de imagens foi calculado o Índice de Neve ou Branco por Diferença Normalizada (NDSI), classificado por limiares, o que resultou em uma imagem da cobertura de dunas para cada data em questão. Para o processamento das imagens foi aplicada a técnica de Detecção de Mudança para analisar as variações na cobertura das dunas ao longo da área de interesse. A subtração na área do campo de dunas observada totalizou uma perda de 459 ha. As perdas nos campos de dunas totalizaram taxas médias de perdas em torno de 15,3 ha/ano, com o principal vetor de mobilidade o padrão dos ventos de quadrante nordeste (NE). Esses dados, no entanto, ainda não são suficientes para esclarecer hipóteses sobre a dinâmica dunar da área de interesse.

Palavras-chave: NDSI, sensoriamento remoto, EOF, dunas.

MULTITEMPORAL ANALYSIS OF THE MOBILE DUNES IN PRAIA DO CASSINO (RS-BRAZIL) BETWEEN 1990 AND 2020 WITH THE USE OF DATA TM-OLI SENSORS FROM A LANDSAT PLATFORMS

ABSTRACT

The loss of area of mobile dunes is a consequence of human occupation and, mainly, the suppression of vegetation cover caused by the removal of sand for use as an input in civil construction, serving as material for earthworks, and insertion

of exotic species. The present study aimed to determine the variation in dune cover over a 42 km stretch at Praia do Cassino, Rio Grande (RS-Brazil) between the years 1990 and 2020. For that, scenes from TM/LANDSAT-5 and OLI/LANDSAT-8 from the years 1990, 2000, 2010, and 2020. With the set of images, the Index of Snow or White by Normalized Difference (ISDN) was calculated, classified by thresholds, which resulted in an image dune coverage for each date in question. For the processing of the images, the Change Detection technique was applied to analyze the variations in the coverage of the dunes along the area of interest. The subtraction in the area of the dune field observed totaled a loss of 459 ha.. Losses in the dune fields totaled average loss rates of around 15.3 ha/year, with the main mobility vector being the northeast wind pattern (NE). These data, however, are not yet sufficient to clarify hypotheses about the dune dynamics of the area of interest.

Key-words: NDSI, remote sensing, EOF, dunes.

INTRODUÇÃO

Dunas costeiras representam uma das principais feições resultantes de processos geomorfológicos de origem eólica (FERNANDES et al., 2017). Essas feições são caracterizadas por depósitos sedimentares formados pela interação de grãos de areia, ação dos ventos e presença de vegetação (SEELIGER & COSTA, 2010). Tais coberturas arenosas são caracterizadas por morfologia diversa e com área que não exceda 125 km² (PYE & TSOAR, 2009). Devido à ação dos ventos, os sedimentos são transportados e depositados na praia a partir da fixação causada pela existência de vegetação. Segundo Manso et al. (2006), dois fatores caracterizam os depósitos eólicos em ambientes costeiros: o abundante

estoque de sedimentos disponíveis e a ação constante do regime de ventos. Nesse sentido, a dinâmica das dunas, ou seja, sua mobilidade ou fixação, é resultado de vários fatores, como a intensidade e orientação dos ventos, a morfodinâmica da praia, a topografia infradunar, a variação do nível freático, a amplitude de marés e o tipo e da natureza sazonal da vegetação costeira.

As dunas podem ser classificadas, segundo Davis (1980), como sendo embrionárias, frontais, transversais, barcanas, parabólicas e transgressivas. Dunas embrionárias são formadas quando os sedimentos que estão em transporte por saltação encontram algum obstáculo e ocorre a deposição (DAVIS, 1980). Seu crescimento ocorre desde que a vegetação acompanhe o processo. As dunas frontais são formadas pelo aprisionamento de dos sedimentos pela vegetação (HESP, 2002). Estas possuem uma associação espacial restrita definida pela dinâmica que caracteriza a praia e o campo de dunas, participando ativamente na troca de sedimentos entre os dois sistemas (PSUTY, 1992). Dunas barcanas, segundo Davis (1980), são feições em formato de meia-lua que ocorrem em ambientes de estoque limitado de sedimentos, e condições de ventos moderados e unidirecionais. O mesmo autor afirma que as dunas parabólicas são formadas em parte pela evolução de *blowouts*, possuindo uma morfologia similar às barcanas, sendo diferenciadas pelo fato de apresentarem extremidades mais fechadas. Já as dunas transgressivas são formadas pelo transporte eólico de material sedimentar em sentido continental, na forma de lençóis de deflação da costa em direção ao continente conforme a orientação e intensidade predominante dos ventos (SILVA et al., 2015).

Importante destacar que as dunas são Área de Preservação Permanente (APP), de uso comum da população, sendo vedada a sua apropriação, ocupação e descaracterização, como define a constituição Federal de 1998 4º/Art. 225 e Lei 7661/Art. 10 do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro. A criação de projetos para manejo de dunas é um relevante instrumento para que haja a conservação das mesmas, assim equilibrando as intervenções antrópicas (PORTZ, 2008). No ambiente costeiro, as dunas possuem importantes

funções ecológicas em virtude de sua grande riqueza de fauna e flora. Dentre suas inúmeras funções, as dunas se destacam por proteger o aquífero livre (lente doce) da salinização, além de manter a cíclica troca de sedimentos com o mar, o que caracteriza essas feições como sendo um importante estoque de sedimentos para substituir a areia do mar que é levada por tempestades (CLARK, 1977).

As dunas também apresentam importantes funções socioeconômicas, servindo de proteção contra a ação de eventos extremos, os quais, em costas expostas, causam sérios prejuízos em termos de perdas de infraestruturas e moradias. O monitoramento do campo de dunas, com base em medições *in situ*, tem sido uns dos grandes desafios dos pesquisadores costeiros em virtude muitas vezes das grandes extensões que essas feições ocupam. De modo a resolver essas questões, os dados de sensoriamento remoto (SR) têm fornecido uma solução de baixo custo para obter observações de longo prazo (VOS et al., 2019).

A partir do uso do sensoriamento remoto, é possível realizar o monitoramento desses ambientes, bem como caracterizar seu fluxo de deslocamento, entre outros aspectos. Informações referentes a mudanças históricas servem de subsídio para a tomada de decisão por parte dos gestores costeiros, principalmente no que diz respeito às questões relacionadas ao planejamento urbano e manejo das dunas. O campo de dunas sugere um cenário dinâmico de mudanças nos arranjos espaciais e temporais, com alterações significativas na geometria da cobertura sedimentar superficial (FERNANDES & AMARAL, 2013). Aplicações de técnicas de SR, fundamentadas em uma classificação supervisionada para quantificação de alterações multi-temporais (e.g. FERNANDES & AMARAL, 2013; FLORENZANO, 2008), são fundamentais para a conservação e manutenção desse sistema.

A partir do exposto, este trabalho apresenta uma análise da cobertura dunar através de ferramentas e técnicas de Sensoriamento Remoto, o mapeamento o sistema de dunas frontais e embrionárias no trecho litorâneo pertencente ao município do Rio Grande (RS), sul do Brasil,

durante os últimos 30 anos (1990-2020). O estudo propôs ainda realizar uma correlação entre o comportamento das dunas e os dados de incidência de eventos extremos na costa, de forma a caracterizar quais parâmetros meteorológicos são predominantes nos processos de remobilização de sedimentos do campo de dunas.

Caracterização da área de estudo

O litoral do Rio Grande do Sul é formado por uma planície costeira arenosa constituída por sedimentos finos a muito finos de natureza policíclica, provenientes do último Máximo Transgressivo Holocênico entre 6 a 5 k.a. antes do presente (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1995), tendo um comprimento de aproximadamente 600 km. No caso do trecho litorâneo do município do Rio Grande, denominado *Praia do Cassino* (coordenadas centrais 32°14'39.9" S e 52°12'15.5" W), este apresenta uma extensão de aproximadamente 240 Km, tendo como limites: ao norte os molhes da Barra e ao sul a praia do Hermenegildo (município de Santa Vitória do

Palmar, extremo sul do RS).

A praia do Cassino (Figura 1) é o principal destino turístico da metade sul do estado do RS, nos meses de veraneio (ALBUQUERQUE et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020). O limite norte da praia do Cassino concentra grande parte das atividades econômicas do município. A praia do Cassino é caracterizada, segundo Efe & Canabarro (2011), como uma praia arenosa com sistema de dunas frontais, declividade suave, antepraia bem desenvolvida, e uma zona de arrebentação composta por um sistema de múltiplos bancos. No limite norte se concentra grande parte das atividades econômicas no trecho analisado, devido à instalação do Novo Porto.

A praia do Cassino tem sido submetida a grandes mudanças, em consequência da ação de tempestades no litoral gaúcho (MACHADO & CALLIARI, 2016; MACHADO et al., 2010). O campo de dunas tem apresentado uma tendência progradante, assim como o sistema praia-duna e os bancos transversais (GOULART, 2014). A região possui um clima mesotérmico brando, superúmido, sem estação seca definida, apresentando taxas de

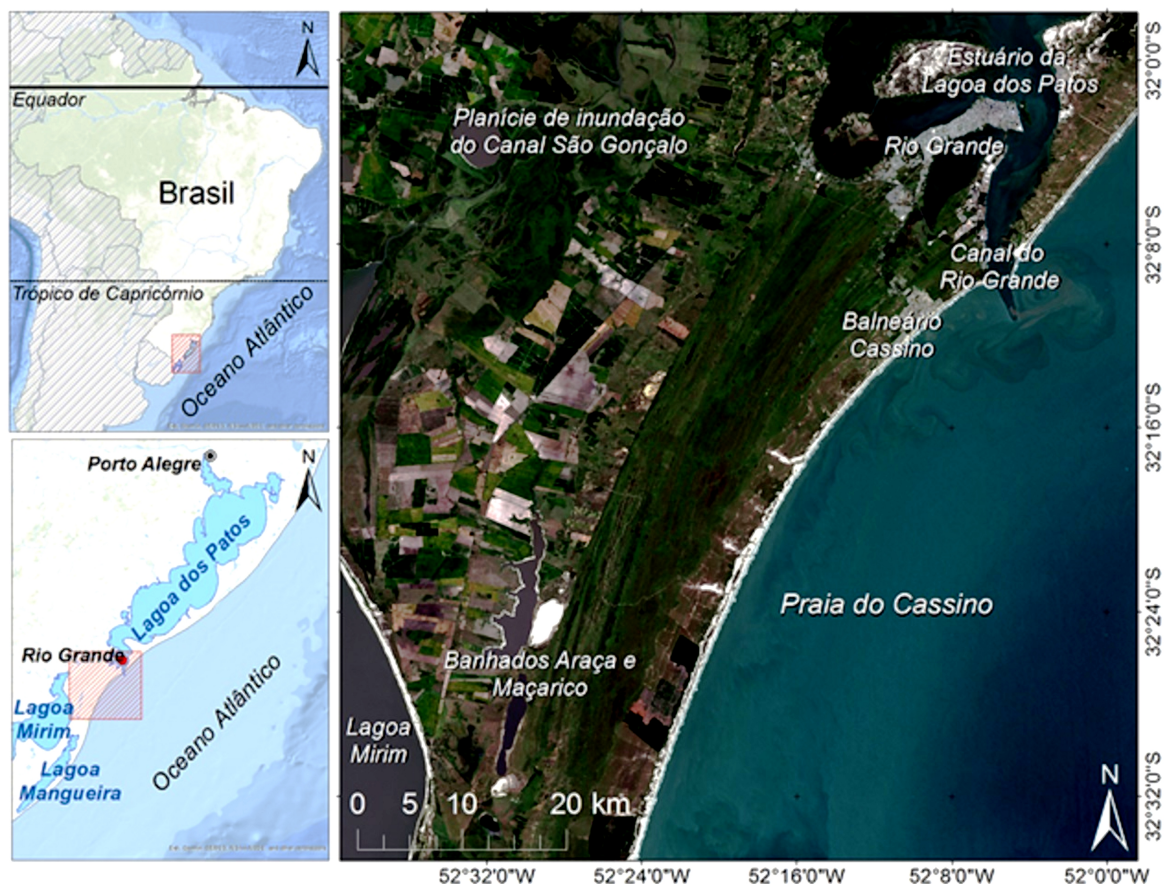


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

precipitação média entre 1200 e 1500 mm anuais (SILVA, 2019). A temperatura média anual fica em torno de 17,5°C, com máximas e mínimas absolutas acima de 38°C e abaixo de 0°C, respectivamente. As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, principalmente no inverno (GONZAGA et al., 2020), com médias de 1300 mm anuais, com aumento dos índices no inverno (NIMER, 1979). A velocidade do vento é baixa e as direções mais frequentes são de nordeste (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1995).

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho se dividiu em três etapas principais: (1) Determinação da área da cobertura de dunas ao longo dos últimos 30 anos para a praia do Cassino a partir de dados de sensores satelitais; (2) Determinação dos padrões espaço-temporais da dinâmica da cobertura de dunas local; e, (3) Análise dos padrões meteorológicos locais, em especial a presença de frentes atmosféricas, ao longo do período, correlacionando os resultados. O fluxograma da Figura 2 descreve, resumidamente, todos os procedimentos realizados.

Aquisição dos dados do imageamento orbital

Para a análise multitemporal utilizaram-se imagens orbitais do sensor TM/LANDSAT-5 para os anos de 1900, 2000 e 2010 e do sensor OLI/LANDSAT-8 para o ano de 2020, ambas com resolução espacial de 30 m. Todas as imagens foram coletadas para o período do verão local, preservando assim as condicionantes climáticas da série. As imagens foram obtidas no repositório eletrônico do Serviço Geológico Americano (USGS). As imagens foram obtidas sem custos, em *Tagged Image File Format* (TIF) e nível de processamento L1T (Figura 3).

Pré-processamento

O primeiro passo do pré-processamento é o processo de calibração da imagem. Neste procedimento é feita uma correção radiométrica da imagem. Essa correção consiste na transformação

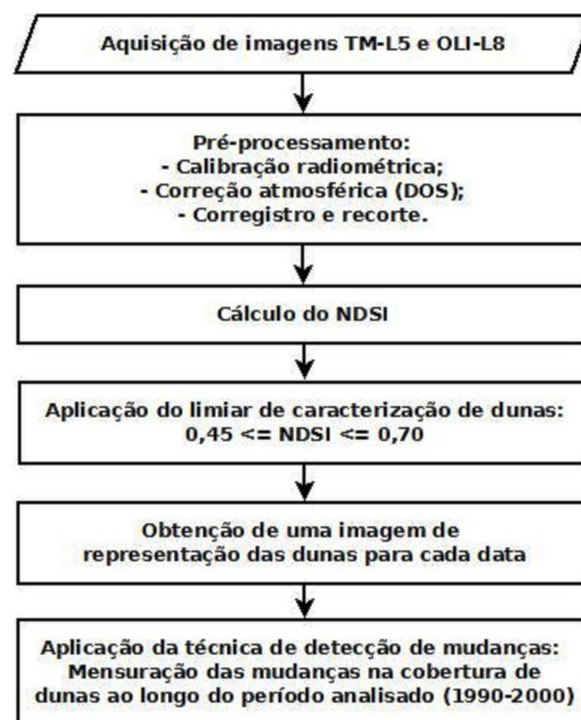


Figura 2. Etapas para a determinação da área da cobertura de dunas com uso de dados de sensores satelitais. Fonte: Os autores.

dos valores pictóricos da imagem de contadores digitais (CD) para valores de radiância espectral. Para a calibração radiométrica foi utilizado o software ENVI, empregando o algoritmo de calibração proposta por Jensen (2012) – equação 1:

$$L = a \cdot CD_{i,j} + b \quad (1)$$

Onde,

- a: Coeficiente linear de relação entre os níveis de radiância e os níveis de representação dos contadores digitais de cada *pixel* (também chamado de ganho do sensor);

- b: Menor valor de radiância registrado pelo sensor em condição de ausência de exposição. Também chamado de *Offset*;

- $CD_{i,j}$: representa o valor de intensidade do pixel em contadores digitais, referente a um *pixel* na posição (i, j);

Com o emprego da equação 1 sobre os valores dos contadores digitais de uma imagem aplicou-se a transformação dos valores de cada unidade pictórica da imagem para uma escala de radiância espectral. Essa transformação dos valores dos *pixels* de contador digital (CD) para valores de radiância espectral foi realizada empregando os



Figura 3. Exemplo de imagem coletada pelo sistema sensor orbital. Imagem OLI/LANDSAT-8 adquirida em dezembro de 2020 em composição RGB *cor-verdadeira*.

fatores de calibração presentes nos metadados da imagem.

O segundo passo foi a realização da correção geométrica da imagem. Esse procedimento foi empregado com o intuito de reduzir os efeitos de dispersão atmosférica, bem como aprimorar o contraste e reduzir os erros sobre os dados-imagem utilizados. Para tanto, foi empregada a técnica de subtração do pixel negro (*Dark Object Subtract* - DOS). No DOS a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir dos contadores digitais (CD) da imagem. Para a aplicação desta técnica não há a necessidade de se obter dados sobre as condições atmosféricas na data de obtenção das imagens.

O DOS assume que existem alvos (pixels) negros nas imagens (e.g. sombras e água profunda), onde os valores se aproximariam ao máximo do CD (contador digital referente ao *pixel* da imagem) mais baixo na imagem, equivalente a cerca de 1%

de refletância. Porém, os valores desses *pixels* representam valores de CD superiores aos esperados, consequência do espalhamento atmosférico, e por isso esses pixels escuros servem de referência para a correção do espalhamento atmosférico.

Portanto, para vias de correção executou-se a determinação estimada dos valores para um alvo de referência (*pixel* negro) e, então, subtraiu-se cada banda espectral pelo respectivo valor de referência. Como resultado, obteve-se uma imagem reduzida dos efeitos atmosféricos.

O terceiro e último passo foi o corregristo, o qual visou a representação espacial dos dados em um sistema de coordenadas geográficas padrão, garantindo a coincidência espacial (Figura 4).

O corregristo dos dados foi realizado junto ao software QGIS que aplica os seguintes passos de processamento sobre as imagens: 1. Aquisição de pontos de controle homólogos entre as imagens; 2.

Cálculo da matriz de transformação espacial para a imagem ajustada em relação a imagem-base; 3. Corregistro da imagem. Com este processo, cada imagem utilizada foi representada em um sistema de coordenadas geográficas padrão, permitindo relacioná-las espacialmente (i.e., UTM, *datum* WGS84 – Zona 22S). O processo constituiu a última etapa de pré-processamento imposta aos

interesse para todas as imagens. A partir daí foi determinada a área de dunas para cada imagem.

Detecção de mudanças na área de cobertura de dunas

O cálculo do ganho e/ou perda de dunas consistiu a relação aritmética simples de variação de área (ΔA), indicada na equação 4, onde quando ΔA é positivo tem-se que a região apresentou ganho de área de duna, e quando negativo perda.

$$\Delta A = A_f - A_i \quad (4)$$

Onde, A_f equivale à área na data final do levantamento e A_i corresponde à área na data inicial do levantamento. Com isso, foi gerada uma imagem de mudanças para a cobertura de dunas em cada intervalo analisado.

Extração dos padrões espaço-temporais das variações no campo de dunas

Para extrair os padrões espaço-temporais de uma variável, utilizou-se a técnica *Empirical Orthogonal Function* (EOF). Essa técnica permite descrever a variabilidade temporal e espacial de um conjunto de dados em termos de funções ortogonais. Os primeiros termos podem representar a maior porção significativa da variação total da série, cujo padrão contém fenômenos com diferentes escalas espacial e temporal. A distinção da variabilidade da série pela soma dos termos ortogonais permite associar as variações a processos físicos distintos.

Na oceanografia e meteorologia, a técnica da EOF é aplicada para compreender o comportamento das forçantes e respectivas escalas temporais e espaciais, responsáveis pela variabilidade de parâmetros como a temperatura e salinidade da superfície do mar, vento e correntes. Normalmente, a variância é explicada pelas primeiras funções ortogonais cujo padrão pode ser associado com algum mecanismo dinâmico local. Mas a relação física e matemática entre os resultados estatísticos da EOF e o mecanismo dinâmico sugerido não necessariamente estão

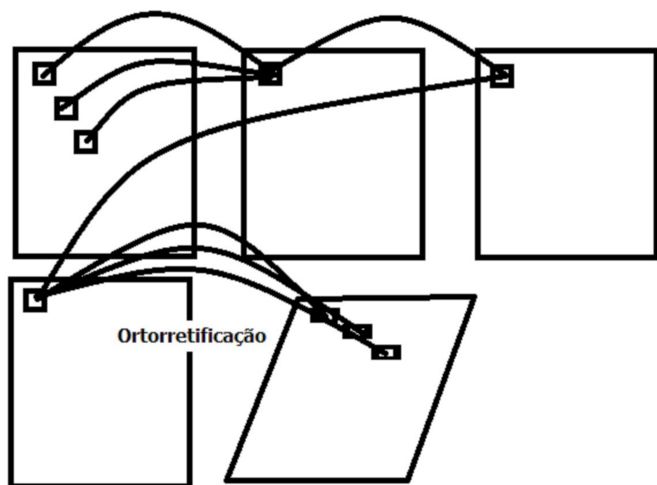


Figura 4. Representação do processo de corregistro. Fonte: Espinoza (2015).

dados.

PROCESSAMENTO

Cálculo do NDSI

Para determinação das áreas de duna, foi executado o cálculo do índice de neve ou branco (*Normalized-Difference Snow Index* - NDSI) para cada imagem, a partir do que propôs Hall et. al (1995). Para o sensor TM, o cálculo é feito através da equação 2:

$$\text{NDSI-TM} = (B2 - B5) / (B2 + B5) \quad (2)$$

Já para o sensor OLI, utilizamos a equação 3:

$$\text{NDSI-OLI} = (B3 - B6) / (B3 + B6) \quad (3)$$

Os valores de NDSI determinados ficaram compreendidos entre -1 e +1. A aplicação de limiares entre 0,45 e 0,7 foi adotado como o intervalo correspondente à área de dunas de

correlacionados. Na aplicação da técnica de EOF pode-se obter a variação de uma propriedade qualquer no espaço e tempo, como a soma de um número de termos finito de EOFs em (x,y) , representando a variabilidade espacial, com amplitude $um(t)$, representando a variabilidade temporal (Equação 5).

$$X(x, y, t) = \sum u_m(t)em(x, y) \quad (5)$$

A componente principal, $um(t)$, informa como a amplitude de cada EOF varia com o tempo. A EOF contém a estrutura espacial dos fatores de variação com maior importância temporal na variação da propriedade de X . A técnica de EOF apresenta algumas condições:

- As componentes principais são ortogonais no tempo. Isto é, não há correlação temporal entre uma ou mais componentes principais;
- A EOFs são ortogonais no espaço, não há correlação entre uma ou mais EOF;

Neste trabalho foram utilizados campos de imagens de dunas obtidas a partir da aplicação de limiares sobre as imagens NDSI geradas. Para o cálculo das EOFs, as imagens foram concatenadas em campos de tempo por valores de cobertura de dunas, gerando uma matriz $dunas=(t,x)$, onde t representa o campo temporal das imagens e x as dunas numa dada posição espacial. A partir desta matriz foi calculada a matriz de covariância cov , que é obtida pela multiplicação da matriz $dunas$ por sua transposta (Equação 6):

$$cov = dunas * dunas' \quad (6)$$

Obtida a matriz de covariância, foi utilizada a função “eig.m”, para se obter os autovalores e autovetores da matriz (Equação 7):

$$[EOF, L]=eig(cov) \quad (7)$$

A saída EOF foi uma matriz quadrada que representa a variabilidade associada a cada valor de dado de entrada, ou seja, os diferentes campos de valores que compõem o dado original (modas). A saída “L” foi uma matriz diagonal que representa a contribuição relativa de cada valor de EOF. Assim, EOF representou a matriz de autovetores, e “L” a

matriz de autovalores. Com a matriz “L” foi possível obter a contribuição percentual de cada EOF, dividindo cada valor de “L” pela soma dos mesmos e multiplicando por 100.

Determinando-se quais os maiores valores de “L” em porcentagem, ou seja, quais são as contribuições, associadas à respectiva EOF, foi possível determinar os campos com maiores contribuições na variabilidade. Primeiramente, se multiplicou a matriz $dunas$ pela matriz de EOF, obtendo-se a matriz de pesos de contribuições da cada campo, PC (Equação 8):

$$PC = dunas * EOF \quad (8)$$

Com a matriz PC, os campos foram reconstruídos pela multiplicação da matriz EOF pela matriz PC. Como somente as primeiras EOFs já reconstroem praticamente toda a variabilidade dos dados, somente os três primeiros campos foram reconstruídos (Equações 9, 10 e 11):

$$EOF1 = EOF(:,1).PC(:,1)' \quad (9)$$

$$EOF2 = EOF(:,2).PC(:,2)' \quad (10)$$

$$EOF3 = EOF(:,3).PC(:,3)' \quad (11)$$

Aquisição e análise dos dados meteorológicos locais

Com intuito de analisar o comportamento do campo de dunas de acordo com a condição meteorológica diária, considerando o vento como o principal agente modelador da paisagem, foram empregados dados provenientes do *Reanalysis* NCEP/NCAR da NOAA, para a praia do Cassino. As informações coletadas abrangem o período de 1 de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 2020, com intervalo dados para as coordenadas 32°14'39.9" S e 52°12'15.5" W.

O banco de dados foi trabalhado no software GRADS. Foram adquiridos dados diários de pressão reduzida ao nível do mar (SLP), componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Com esses dados, foram gerados mapas dos campos de pressão, vento e vortacidade, permitindo extrair a presença de frentes atmosféricas que incidiram sobre a área de estudo, para o período analisado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O campo de dunas móveis da praia do Cassino apresenta cerca de 1759 ha. Essa área atual é decorrência de forte redução na cobertura de dunas, de modo que é possível identificar que, ao longo dos anos, há perda das células sedimentares que gradativamente reduziram o campo de dunas, interiorizando os sedimentos no campo de dunas transgressivas. Em geral, o sistema dunar da praia do Cassino se comporta em conformidade com os resultados obtidos por Goulart (2014), onde o sistema praia-duna, bem como o sistema de múltiplos bancos, apresenta tendência progradante. No entanto, isto não foi observado em toda a extensão mapeada, havendo setores em estabilidade (porção sul) ou mesmo retração (porção nordeste, proximidade do Terminal) como identificado na Figura 9.

Atualmente, essa dinâmica natural encontra-se comprometida devido às construções e a dinâmica antrópica, passível de observação através da ferramenta de visualização da dinâmica temporal *Google Engine Time Lapse* (disponível em: <https://earthengine.google.com/timelapse/>). Quanto à morfologia das dunas, é possível afirmar que as subáreas ocorrem dunas que progridem para o interior do continente na direção *NE-SO*, resultando em um sentido de movimentação *SO*. Essas feições dunares são conhecidas pelo seu aspecto transgressivo, com gênese associada a *blowouts*

(DILLENBURG et al., 2017), denotando assim que os ventos que sopram do quadrante NE são os de maior competência no transporte eólico (75% dos dias do ano para a região, Figura 12).

Em 30 anos de observação, há resultante negativa de sedimentos nos campos de dunas, deste modo pode-se dizer que para os intervalos de 1990-2000, 2000-2010 e 2010-2020 houve constante perda de área dunar. Os dados de mudança na cobertura de dunas estão presentes nas Figuras 5 e 6. Uma diminuição na área do campo de dunas é observada de maneira evidente para todo o período, totalizando uma redução de cerca 459 ha, aproximadamente. A taxa média de redução, em termos de área, foi de 15,3 ha/ano.

A quantificação das áreas de acúmulo e perda de área de dunas, a partir do sensoriamento remoto, também possibilitou espacializar as localidades onde esses processos são mais evidentes. Como esperado, as maiores perdas concentraram-se principalmente no barlavento destes campos de dunas, ao passo que os maiores ganhos sedimentares concentram-se no sotavento, conforme a natureza transgressiva dessas morfologias (Figuras 5 e 6). Considerando a análise dos dados para o período (Figura 7), determinaram-se os saldos por intervalos (Figura 8).

As áreas que sofreram variação na cobertura de dunas (Figura 9), exibem um padrão de perda da cobertura na porção interior, enquanto há um ganho na porção litorânea (Figura 9). Pela aplicação da

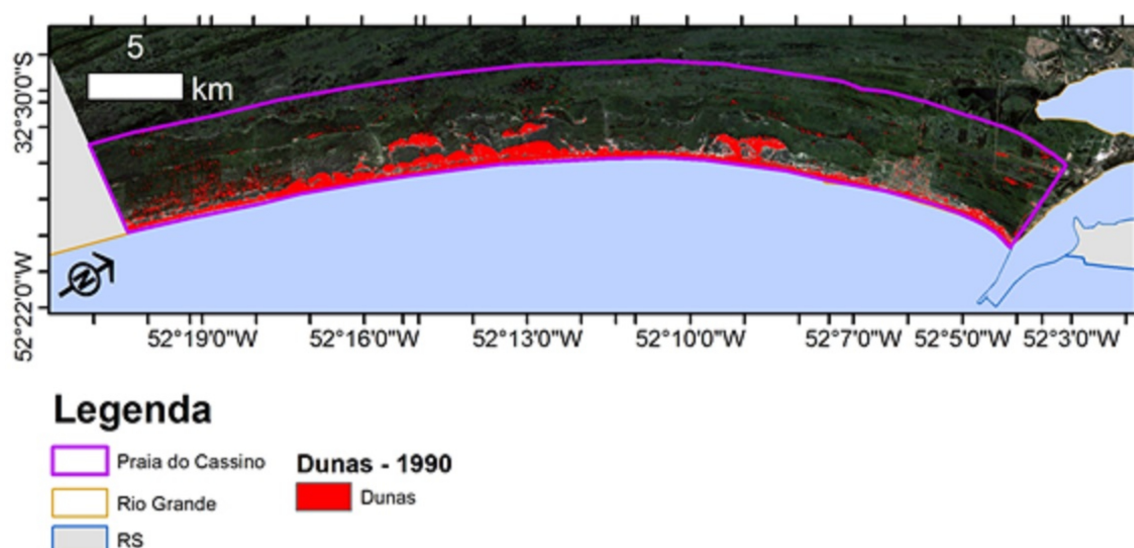


Figura 5. Indicação da classificação da área de cobertura de dunas para o ano de 1990.

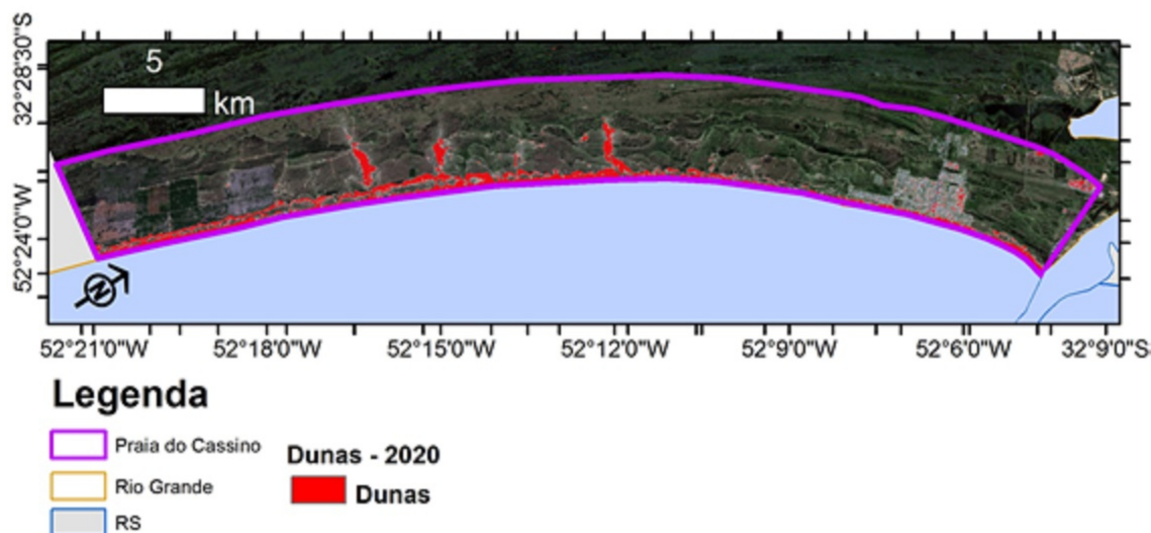


Figura 6. Indicação da classificação da área de cobertura de dunas para o ano de 2020.

análise de EOFs implementada sobre a série de dados de mapeamento da cobertura de dunas para o período, foi extraído o padrão espaço temporal de ganho e redução dessa cobertura ao longo da área de interesse, representados pela Figura 9. A maior parte das porções do campo de dunas analisado se encontra em tendência de redução de sua cobertura (69,8% do total), enquanto uma parcela localizada na porção frontal a praia assume caráter de tendência de crescimento (correspondendo a 12,4%). 10,6% assumem caráter de estabilidade, enquanto 7,2% possuem padrão indeterminado.

Cabe destacar, o caráter sazonal e mesmo periódico - neste caso, associado a ocorrência de anomalias climáticas, como aquelas decorrentes dos fenômenos *El Niño* (maior precipitação) e *La Niña* (menor precipitação) na região sul do Brasil - visto que a dinâmica de chuvas tem influência direta na recarga freática e no aumento da atividade vegetativa, fatores decisivos para a estabilidade do

campo dunar (SEELIGER & COSTA, 2010). Neste sentido, as variações observadas possuem grande influência dos padrões locais das forçantes meteorológicas como a precipitação (Figura 10), a pressão atmosférica (Figura 11) e o vento (Figura 12) ao longo do período, além da ocupação do solo e da dinâmica oceanográfica local.

A análise dos dados meteorológicos indicou um aumento de anomalias positivas para na ocorrência de chuvas (precipitação líquida), com um total de ocorrência de frentes atmosféricas com a formação de ciclogênese no período num total de 236, com média de 8 eventos por ano. Assim, os estados de normalidade e tendência de anomalias positivas na precipitação podem ter proporcionado condições de estabilidade (como o já citado, desenvolvimento da vegetação e oscilação positiva do nível freático), o que repercute na fixação das dunas outrora móveis. No tocante a ciclogênese e vortacidade, foi possível identificar que os

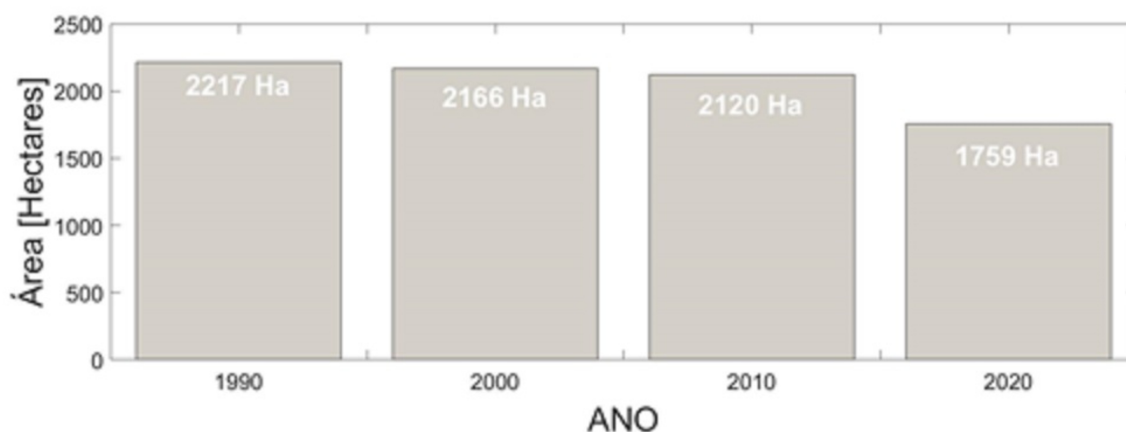


Figura 7. Área de cobertura de dunas para cada momento do período analisado.

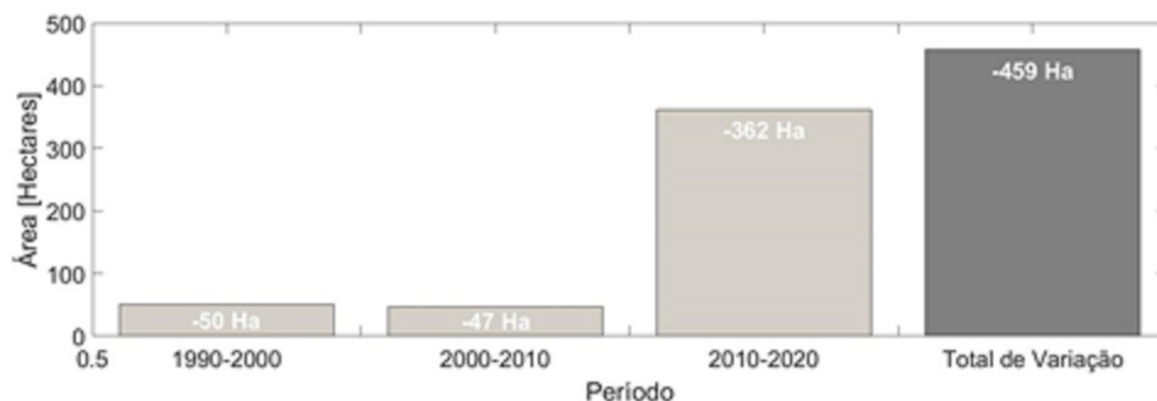


Figura 8. Variação da área de cobertura de dunas no período analisado.

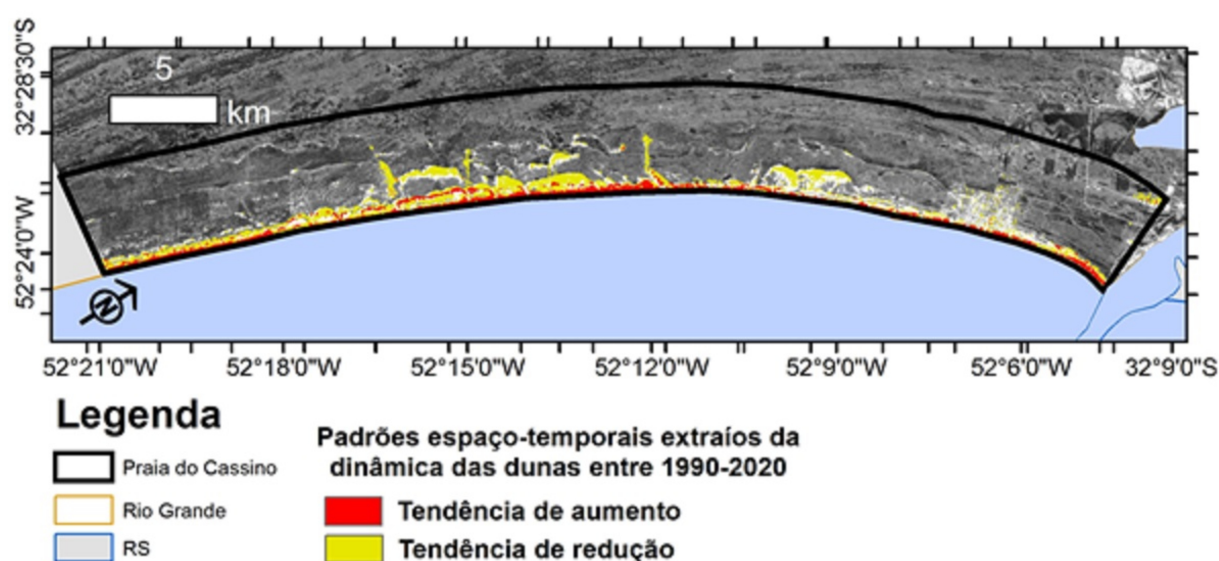


Figura 9. Padrão espaço temporal de ganho e redução dessa cobertura ao longo da área de interesse.

intervalos de anomalias de pressão se relacionam com os eventos de precipitação.

Todavia, diferente da progradação das dunas frontais (tendência de aumento representada pela cor vermelha na Figura 9), a fixação/estabilidade não responde integralmente sobre a redução do campo de dunas móveis. Fatores antrópicos, como destacado anteriormente, podem contribuir significativamente no aporte de sedimentos. A expansão urbana, a implantação de novos loteamentos, a canalização/retificação de valas de drenagem dos banhados, a construção do Parque Eólico dos Senandes e áreas de silvicultura, como o cultivo de *pinus*, podem ter impactado a distribuição dos sedimentos, assim como a ação dos ventos sobre o campo dunar. Neste sentido, estudos específicos que cruzem os dados apresentados aqui com a dinâmica de uso e ocupação costeira (como

aqueles desenvolvidos por MASCARELLO et al., 2016) são necessários.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante os 30 anos de observação, pode-se afirmar que as dunas eólicas do Cassino são megaformas em constante processo de expansão rumo a direção sudoeste e com progradação da faixa praial, muito embora ocorram episódios de significativa perda de sedimento ao longo desse período. A ocorrência de perdas ao longo da área apresenta-se como o maior responsável pela manutenção do quadro de redução observado. No entanto, ao cruzar dados meteoceanográficos para a região de estudo, não se descarta a influência da precipitação no desenvolvimento vegetacional a retroterra e consequente estabilização das dunas na

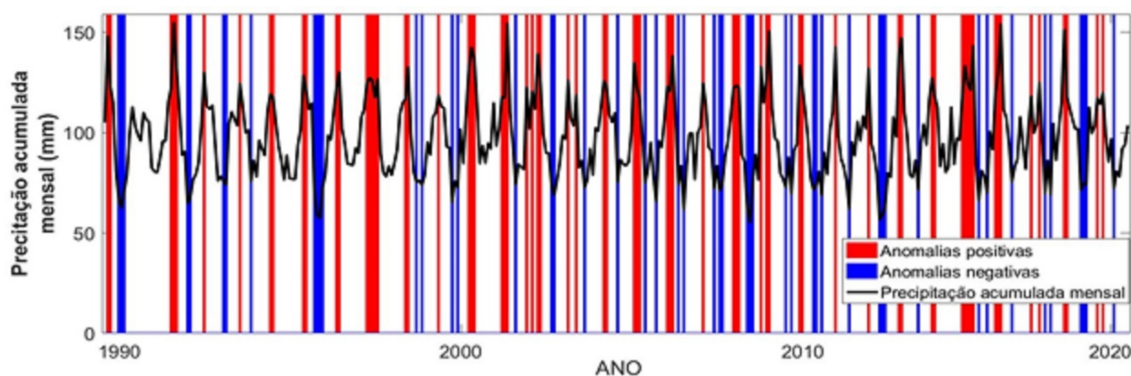


Figura 10. Precipitação local ao longo do período analisado.

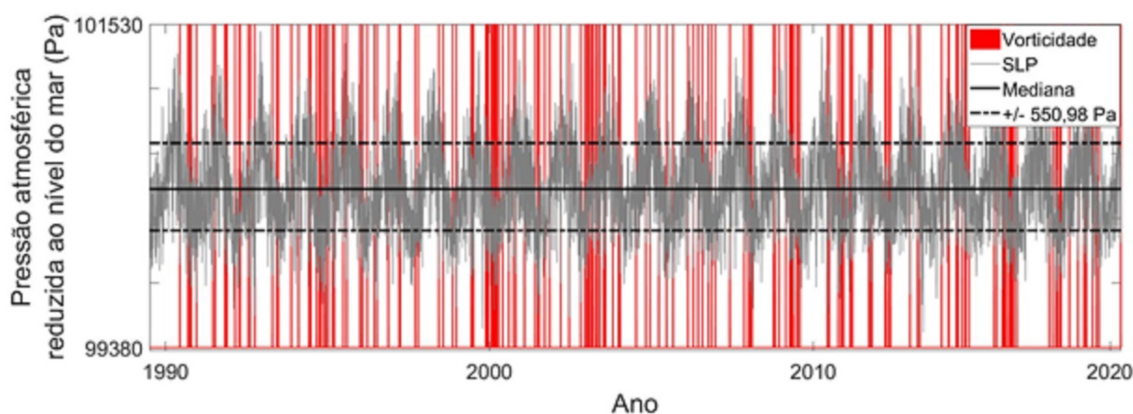


Figura 11. Pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (SLP) local ao longo do período analisado.

porção continental.

Foi possível diagnosticar que a tendência progradante do sistema praia-duna do Cassino, devidamente documentado em diversas publicações científicas, está claramente representada no aumento da faixa mais próxima a linha de costa, com a dinâmica de acreção das dunas frontais. No entanto, tal processo não ocorre em todo o trecho analisado, o que indica que existem áreas de acreção, bem como estáveis e até mesmo erosivas no que tange a dinâmica das dunas frontais, dinâmica que, provavelmente, se reflita também no sistema praia-duna como um todo.

Essas informações, contudo, devem ser consideradas como um diagnóstico preliminar, sendo os resultados atuais insuficientes para estabelecer a compreensão definitiva das causas das modificações ocorridas no campo de dunas, o que definiria a evolução dunar da área de estudo. Pesquisas futuras devem acompanhar essa evolução em diferentes escalas temporais, longo e curto prazo, de modo a melhor se integrar com os dados

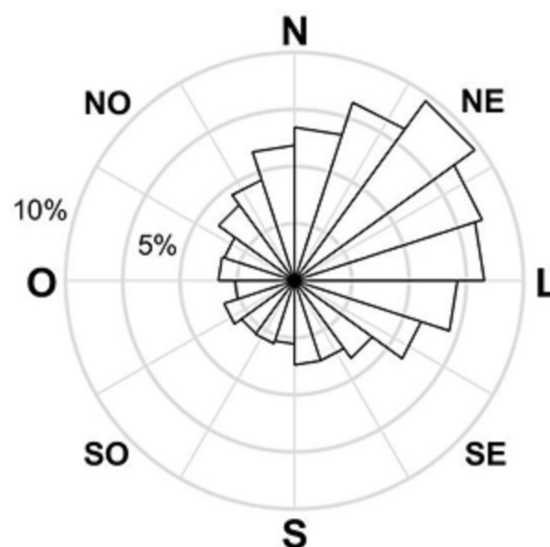


Figura 12. Orientação do vento local ao longo do período analisado.

meteorológicos, observando-se os efeitos da sazonalidade e de eventos climáticos regionais e globais sobre o padrão dessas megaformas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, M. G.; PEREIRA, B. M.; ALVES, D. C. L. & ESPINOZA, J. M. A. 2020. Estudo comparativo entre modelos digitais de elevação obtidos por duas diferentes aeronaves remotamente pilotadas: estudo de caso em uma costa arenosa. *Revista Eletrônica do PRODEMA*, **14** (1): 134-150. <http://dx.doi.org/102241/rede2020.1401.09>.
- CLARK, J.R. 1977. Coastal environment management. Wiley, Chichester, UK
- SEELIGER, U. & COSTA, C. S. B. 2010. As dunas costeiras adjacentes ao estuário. In: SEELIGER, U., ODEBRECHT, C. (oed.). *O Estuário da Lagoa dos Patos: um Século de Transformações*, pp. 137-146, Editora da FURG, Rio Grande - RS.
- DAVIS, J. L. 1980. *Geographical Variation in Coastal Development*. London, UK: Longman. (ISBN: 978-05-82490-06-2).
- DILLENBURG, S. R., BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C. C., CARON, F. & SAWAKUCHI, A. O. 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7–6 ka. *Marine Geology*, 390: 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.06.007>.
- EFE, M. ; CANABARRO, P. L. 2011. Praia do Cassino. In: NASCIMENTO, J. L. X.; STRAUBE, F. C.; VALENTE, R.; SILVA, J. M. C. (Eds.). *Conservação de Aves Migratórias Neárticas no Brasil*, pp. 342-346, Ed. Conservação Internacional. Belém, Pará. (ISBN: 978-85-98830-15-5).
- ESPINOZA, J. M. A. ; ARIGONY-NETO, J. & JANA, R. 2015. Comparação entre os principais modelos para o retroespalhamento SAR da neve. *Revista Brasileira de Cartografia*, **67** (3): 637-653.
- FERNANDEZ, G. B.; PEREIRA, T. G.; ROCHA, T. B.; MALUF, V.; MOULTON, M. & OLIVEIRA FILHO, S. R. 2017. Classificação morfológica das dunas costeiras entre Cabo Frio e o Cabo Búzios, litoral do estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **18** (3): 595-622. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i3.862>.
- FERNANDES, L. R. & AMARAL, R. F. 2013. Paisagem costeira do litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte (Brasil): evolução temporal e padrões espaciais dos campos de dunas móveis. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, **13** (1): 45-59. <http://dx.doi.org/10.5894/rgci340>.
- FLORENZANO, T. G. 2008. Sensoriamento Remoto para Geomorfologia. In: FLORENZANO, T. G. (Ed.). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*, pp.31-71, Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil.
- GIANNINI, P. C. F.; ASSINE, M. L.; BARBOSA, L. M.; BARRETO, A. M. F.; CARVALHO, A. M.; CLAUDINO-SALES, V.; MAIA, L. P.; MARTINHO, C. T.; PEULVAST, J. P.; SAWAKUCHI, A. O. & TOMAZELLI, L. J. 2005. Dunas e paleodunas costeiras interiores. In: SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; DE OLIVEIRA, P. E. & OLIVEIRA, A. M. S.(Eds.). *Quaternário do Brasil*, pp 235-257, Holos Editora, Ribeirão Preto, São Paulo. (ISBN: 85-86699-47-0).
- GONZAGA, B. A.; ALVES, D. L.; ALBUQUERQUE, M. G.; ESPINOZA, J. M. A.; ALMEIDA, L. P. & WESCHENFELDER, J. 2020. Development of a low-cost ultrasonic sensor for groundwater monitoring in coastal environments: validation using field and laboratory observations. *Journal of Coastal Research*, **95** (SI): 1001-1005. <https://doi.org/10.2112/SI95-195.1>.
- GOULART, E. S. 2014. *Variabilidade morfodinâmica temporal e eventos de inundação em um sistema praiial com múltiplos bancos*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande - RS, 143 p.
- HESP, P. A. 2002. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, **48**: 245–268.
- JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.
- MACHADO, A. A. & CALLIARI, L. J. 2016. Synoptic Systems Generators of Extreme Wind in Southern Brazil: Atmospheric Conditions and

- Consequences in the Coastal Zone. *Journal of Coastal Research*, **75**: 1182–1186. <http://doi.org/10.2112/SI75-237.1>.
- MACHADO, A. A.; CALLIARI, L. J.; MELO, E. & KLEIN, A. H. F. 2010. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, **5**: 105-114.
- MANSO, V. A. V.; COUTINHO, P. N.; GUERRA, N. C.; SOARES JUNIOR, C. F. A. 2006. Pernambuco. In: MUEHE, D. (Ed.). *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*. Brasília, pp. 179-196, Ministério do Meio Ambiente, Brasília. (ISBN: 978-85-7738-028-9)
- MASCARELLO, M. A.; GANDRA, T. B. R.; ESPINOZA, J. M. A. & ASMUS, M. L. 2016. Conflitos espaciais entre instrumentos legais de planejamento territorial: caso de estudo na região do Balneário Cassino (Rio Grande, RS). *Desenvolvimento e Meio Ambiente (UFPR)*, **38**: 325-346.
- NIMER, E. 1979. Climatologia da região Nordeste. In: *Climatologia do Brasil*, pp. 315-361, IBGE, Rio de Janeiro - RJ.
- OLIVEIRA, U. R.; SIMÕES, R. S.; PORTO, F. S.; CAMINHA, E. S.; CALLIARI, L. J. & ROMEU, M. A. R. 2020. Análise da dinâmica praial após a deposição de lama em 2014 na praia do Cassino (RS, Brasil) utilizando aeronave remotamente pilotada. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **21** (3): 677-695. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1462>.
- PORTZ, L. C. 2008. *Contribuição para o estudo do manejo de dunas: caso das praias de Osório e Xangri-lá, litoral norte do Rio Grande do Sul*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 144p.
- PSUTY, N. P. 1992. Spatial variation in coastal foredune development. In: Carter, R.W.G. et al. (Ed.) *Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation: Proceedings of the 3rd European Dune Congress Galway*, pp. 17-21, Ireland.
- PYE, K. & TSOAR, H. 2009. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. 416p., Springer, Amsterdam, Netherlands. (ISBN: 978-3-540-85909-3).
- SILVA, F. E.; AMARO, V. E.; MATOS, M. F. A. 2015. Análise Multitemporal dos Campos de Dunas Móveis do Litoral setentrional do Rio Grande do Norte. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, Paraíba, 6966-6973.
- SILVA, T. R. 2019. *Precipitação em Rio Grande - RS (1913-2016): Análise descritiva e da variabilidade*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande - RS, 90 p.
- VILLWOCK, J. A. & TOMAZELLI, L. J. 1995. *Geologia costeira do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CECO/UFRGS, 45 p.
- VOS, K.; SPLINTER, K. D.; HARLEY, M. D.; SIMMONS, J. A. & TURNER, I. L. 2019. Coastsat: a google earth engine-enable python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, **122**: 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>.