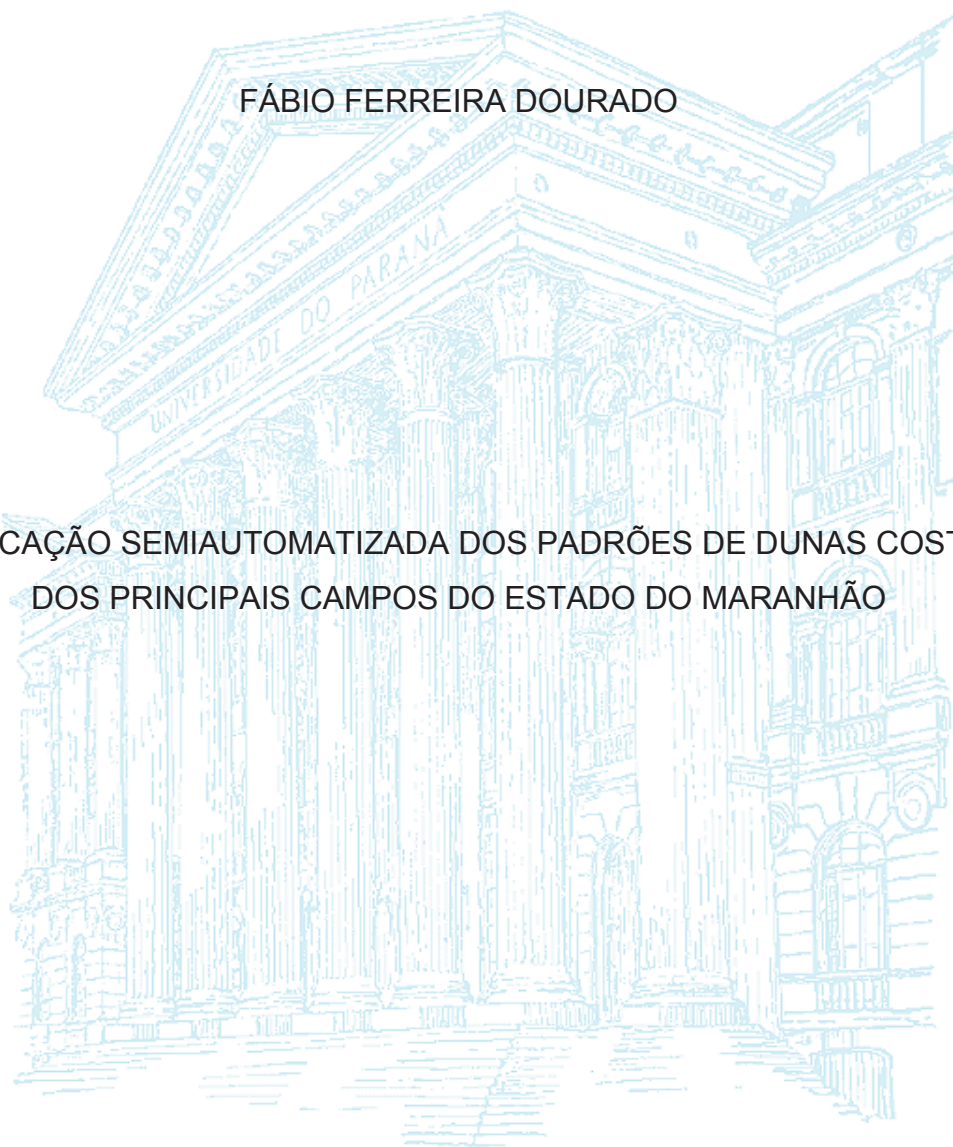


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FÁBIO FERREIRA DOURADO

CLASSIFICAÇÃO SEMIAUTOMATIZADA DOS PADRÕES DE DUNAS COSTEIRAS
DOS PRINCIPAIS CAMPOS DO ESTADO DO MARANHÃO



CURITIBA

2019

FÁBIO FERREIRA DOURADO

CLASSIFICAÇÃO SEMIAUTOMATIZADA DOS PADRÕES DE DUNAS COSTEIRAS
DOS PRINCIPAIS CAMPOS DO ESTADO DO MARANHÃO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná (UFPR), área de concentração em Geologia Ambiental, linha de pesquisa de Evolução, Dinâmica e Recursos Costeiros, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Conforti Ferreira Guedes.
Co-orientador: Dr. Cleyton de Carvalho Carneiro (PMI/USP)

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

D739c

Dourado, Fábio Ferreira

Classificação semiautomatizada dos padrões de dunas costeiras dos principais campos do estado do Maranhão [recurso eletrônico] / Fábio Ferreira Dourado. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós- Graduação em Geologia, 2019.

Orientador: Carlos Conforti Ferreira Guedes. Coorientador: Cleyton de Carvalho Carneiro.

1. Dunas – conservação. 2. LANDSAT (Satélites). 3. Baixadas costeiras. 4. Processamento de imagens. I. Universidade Federal do Paraná. II. Guedes, Carlos Conforti Ferreira. III. Carneiro, Cleyton de Carvalho. IV. Título.

CDD: 577.583

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FÁBIO FERREIRA DOURADO**, intitulada: **CLASSIFICAÇÃO SEMIAUTOMATIZADA DOS PADRÕES DE DUNAS COSTEIRAS DOS PRINCIPAIS CAMPOS DOS ESTADOS DO MARANHÃO**, sob orientação do Prof. Dr. CARLOS CONFORTI FERREIRA GUEDES, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 20 de Maio de 2019.

CARLOS CONFORTI FERREIRA GUEDES
Presidente da Banca Examinadora

CAROLINE THAIS MARTINHO POZOCCO
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE
CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL)

MARIA LUIZA CORREA DA CAMARA ROSA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL)

ANDRÉ OLIVEIRA SAWAKUCHI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

A minha família e amigos, em especial os meus pais Fatima e Manoel e meus irmãos Marcelo e Murilo que me apoiaram e incentivaram todo o tempo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, pela minha vida, saúde e por me permitir ser o primeiro mestre da família, dentre muitos outros que virão. Agradeço também pela vida da minha família e amigos. Todos são preciosos e fundamentais pra mim.

Em especial aos meus pais Fátima Dourado e Manoel Dourado por todo incentivo, apoio e principalmente pela confiança em me permitir atravessar o Brasil atrás dos meus sonhos. Agradeço também aos meus irmãos Marcelo Dourado e Murilo Dourado.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Carlos Conforti Ferreira Guedes e Prof. Dr. Cleyton de Carvalho Carneiro por terem me acompanhando em todos os momentos no desenvolvimento desse trabalho, compartilhando seus conhecimentos valiosos e preciosos, em especial ao Carlos Guedes pela extrema paciência e insistência que teve, as quais foram essenciais para o êxito desse trabalho.

A todos meus grandes amigos e amigas que fiz no mestrado, em especial todos que conheci e convivi dentro do LabGeol (Sala 6A-10), que foi praticamente a minha casa em Curitiba. Agradeço também aos amigos e amigas do LABAP, LPH e LAMIR. Todos vocês foram fundamentais nessa caminhada. Obrigado pelos cafés da tarde, por todos almoços e jantas no RU e por todos os rolês em Curitiba.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e em especial ao programa de Pós-Graduação em Geologia por ter me acolhido tão bem nesse mestrado.

À CAPES pela bolsa de mestrado.

“Não há no mundo exagero mais belo que a gratidão” - Jean de La Bruyere

MUITO OBRIGADO A TODOS!

*“questions of science, science and progress”
The Scientist by Coldplay*

RESUMO

Os estudos sobre os sistemas eólicos costeiros de caráter quantitativos são realizados a partir dos parâmetros morfoplanimétricos. Estes parâmetros refletem as disposições espaciais das dunas dentro de um sistema eólico que, por sua vez, representam determinado estágio de evolução e maturidade do sistema no tempo, e são resultantes de condições limites impostas aos sistemas eólicos. Os objetivos do presente trabalho são: com base na análise quantitativa dos parâmetros morfoplanimétricos, entender a evolução dos quatro principais campos de dunas costeiras do Maranhão e sua relação com as condições limites impostas a esses campos. E, elaborar um algoritmo a partir do método *self-organizing maps* (SOM) para a extração semiautomática das dunas em dados do satélite LANDSAT 8, uma vez que esse processo de extração atualmente é feito manualmente em trabalhos, que torna trabalhoso para campo de dunas extensos. Para realizar o primeiro objetivo foram extraídas de modo manual, a partir da identificação visual em imagens do satélite *GeoEye*, as cristas das dunas, representadas por linhas. Essas cristas foram utilizadas como subsídio para a geração dos parâmetros morfoplanimétricos. Os parâmetros de espaçamento intercristas e densidade de defeitos de crista são os parâmetros que apresentaram melhor correlação, com correlação negativa para os três maiores campos de dunas de estudos e correlação positiva para o campo de Ilha do Caju. Essa correlação negativa indica dois diferentes cenários de evolução nos campos, o primeiro cenário com regiões mais evoluídas, de dunas muito interagentes entre si, e a segunda com regiões menos evoluídas, com dunas pouco interagentes. Já a Ilha do Caju apresenta uma maior evolução homogênea se comparada aos campos de maiores áreas que indicam uma evolução e maturação mais rápida em campos menores. Para o segundo objetivo foi necessário filtrar e selecionar, através de uma matriz de correlação, quais as bandas óticas de sensores remotos são mais eficientes para utilizar como dado de entrada no treinamento do algoritmo de reconhecimento automático das dunas. O algoritmo treinado conseguiu distinguir as feições de dunas e as demais feições dentro do campo dunar. Porém, dentre as variáveis usadas no treinamento, as bandas óticas 2 e 7 foram redundantes e, com isso, será necessário um novo treinamento sem essas bandas para que se obtenha uma maior precisão no reconhecimento das dunas em sistemas eólicos.

Palavras-chave: semiautomatizada; parâmetros morfoplanimétricos; Self-Organizing Maps

ABSTRACT

Quantitative studies on coastal wind systems are usually performed based on morphometric parameters. These parameters reflect the spatial arrangement of dunes within a wind system which in turn represents the stage of evolution and maturity of it over time and is the result of boundary conditions imposed on the system. The objectives of the present work are: understand the evolution of the four main coastal dune fields in Maranhão and their relationship with the boundary conditions imposed on these fields; elaborate an algorithm based on the self-organizing maps method (SOM) for the semiautomatic extraction of dunes from LANDSAT 8 satellite data, facilitating the study modern wind systems, since this process is now done manually, requiring extensive work. In order to accomplish the first objective, the dune crests represented by lines were extracted manually based on visual identification in GeoEye satellite images. These crests were used as a subsidy for the generation of morphometric parameters. The parameters of intercrest spacing and crest defect density presented the best correlation, with negative correlation for the three largest dune fields and positive correlation for the Caju Island field. This negative correlation indicates that there is a differentiated evolution in the fields, the first one with more developed regions, of very interacted dunes, and the second with less developed regions, with little interacted dunes. Caju Island is the most mature and homogeneous when compared to the larger ones, indicating a faster evolution and maturation of smaller fields. Concerning the second objective, it was necessary to filter and select remote sensor optical bands, applying a correlation matrix, in order to indentify the more efficient ones to use as input data in the automatic dune recognition algorithm training. The trained algorithm was able to distinguish the features of the dune field and individual dunes, despite the identification of the redundancy of the optical bands 2 and 7, which reduced the precision the proposed method. A new training without these bands is necessary to obtain a better precision in the recognition of dunes in wind systems.

Keywords: semiautomatized; morphometric parameters; Self-Organizing Maps

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A) Mapa regional apresentando os campos de dunas de estudo situados no estado do Maranhão. B) Lençóis Maranhenses. C) Pequenos Lençóis Maranhenses. D) Tutóia. E) Ilha do Caju.	3
Figura 2 - Distribuições dos campos de dunas costeiros bem desenvolvidos e pequenos campos ao longo do planeta. Fonte: adaptado de Martínéz et al. (2004). ..	5
Figura 3 - Principais tipos de dunas eólicas. A) transversal; B) barcanóide; C) barcanas; D) linear; E) estrela; F) reversa; G) parabólica; H) ruptura de deflação ou blowout; e I) dômica. Fonte: McKee (1979), Giannini (2007).	7
Figura 4 - Os quatro principais tipos de dunas e a sua relação entre os parâmetros morfodinâmicos (aporte sedimentar x complexidade do regime eólico) representados pela relação entre a magnitude do vetor deriva eólica potencial resultante, ou DEPR, e a deriva eólica potencial resultante, ou DEPR, e a deriva eólica potencial (escalar) total, ou DEP _T . Adaptado de: Wasson & Hyde (1983), Giannini et al. (2007).	8
Figura 5 - Principais tipos de sistemas eólicos costeiros dos modelos brasileiros, sob dinâmica de vento efetivo transversal à linha de costa. A, B e C são associações de elementos morfológicos: praia-duna, planície deflacionar e campo de dunas livres, respectivamente. Do tipo 1 ao 8, tem-se crescimento no saldo sedimentar eólico relativo (aporte eólico/espaco de acumulação) (Giannini et al., 2014).	10
Figura 6 - Diagrama com representações dos parâmetros morfoplanimétricos das dunas do tipo crescênticas. Adaptado de Ewing et al. 2006 e Beveridge et al. 2006.	12
Figura 7 - Dinâmica dos cenários de sistemas eólicos e sua relação com o nível relativo do nível do mar. A) durante ou logo após a queda do NRM. B) durante a subida do NRM (Sawakuchi et al., 2003).	15
Figura 8 - Princípio baseado na formação do campo de dunas a partir da ascensão marinha (transgressão). A: elevação de NRM, A _i : elevação do fundo sedimentar, D: profundidade. E: altura eólica de equilíbrio, V: volume colocado em desequilíbrio pela elevação do NRM, V _i : volume de areia deslocado pelo vento. Adaptado de Bruun (1962).	16

Figura 9 - Posicionamento da ZCIT ao longo dos meses do ano em relação a área de estudo e sua relação direta com a quantidade de chuva e intensidade de vento na região costeira nordeste da América do Sul. Adaptado de Tsoar et al. (2009), Guedes (2012) e Luna et al. (2012).	20
Figura 10 - Banco de dados utilizados como base cartográfica, referente ao campo de dunas Lençóis Maranhenses. A) imagem ótica de alta resolução. B) imagem do modelo digital de superfície (MDS) de 30 metros de resolução espacial.	24
Figura 11 - Processo de extração manual das cristas das dunas. A) Identificação visual em imagem ótica de alta resolução. B) Representação das dunas por meio das cristas.	24
Figura 12 - Representação esquemática dos dados de entrada e saída utilizados e obtidos com o interpolador IDW. A) dados de linhas com discretização por cores diferentes as diferentes classes. B) dado interpolado com agrupamento das linhas com as mesmas classes.	25
Figura 13 - Representação dos dados de entrada e saída do estimador de densidade kernel, que resulta (no dado de saída) nas regiões com baixas e altas concentrações de dados. A) dados de pontos utilizados para a obtenção dos mapas de densidade de defeitos de cristas. B) dados de linhas com representação das cristas utilizadas para a obtenção dos mapas do espaçamento intercristas.	26
Figura 14 - Representação de duas diferentes morfologias de dunas e como o cálculo da razão é para a geração do mapa do índice de sinuosidade.	27
Figura 15 - Fluxograma com setorização das etapas desenvolvidas para extração e geração dos parâmetros morfoplanimétricos.	28
Figura 16 - Base cartográfica digital utilizada no treinamento do algoritmo com a resolução radiométrica de cada banda (situada inferior à esquerda).	29
Figura 17 - Região sudeste do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses usada como região modelo para o banco de dados de entrada do treinamento. Em destaque (quadrado amarelo) a janela com dado vazio para a predição das dunas a partir do treinamento do algoritmo. Os polígonos vermelhos delimitam as regiões com dunas e o que está fora do polígono representam os outros componentes do campo de dunas.	30
Figura 18 - Fluxograma com as etapas desenvolvidas no treinamento do algoritmo de classificação semiautomatizada das cristas de dunas.	32

Figura 19 - Components plot com as variáveis de entrada utilizadas no treinamento SOM.	67
Figura 20 - Matriz-U com os dois grupos de amostras. As cores frias (tons de azul) representam neurônios adjacentes com maior similaridade, já as cores quentes (tons de vermelho) indicam maior distância ou separação euclidiana, ou ainda, neurônios com maior dissimilaridade.	68
Figura 21 - Resultado do treinamento do algoritmo SOM que compara os dados de entrada e de saída. Os valores de saída preditos (quadrado amarelo) mais próximos de 1 representam informações espectrais de dunas. Já os valores mais próximos de 0 representam os demais componentes do campo (não-duna).	69
Figura 22 - A) Resultado gerado pelo algoritmo treinado que distingue regiões com dunas e não-dunas. B) Próxima etapa para a extração dos centróides dos polígonos das dunas, os quais representarão as cristas das dunas. Adaptado de Nyberg et al. (2015).	70

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO

Figura A1 - A) Mapa de localização dos campos de dunas do Maranhão com as toponímias locais. B) Campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. C) Campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. D) Campo de dunas de Tutóia. E) Campo de dunas Ilha do Caju.	39
Figura A2 - Fluxograma com as etapas desenvolvidas no projeto.	41
Figura A3 - Mapas altimétricos dos campos de dunas e seus entornos. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.....	43
Figura A4 - Mapas com menores e maiores espaçamentos intercristas dos campos de dunas. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.	44
Figura A5 - Mapas de orientação de cristas com o diagrama de rosetas (na porção superior a direita) de cada campo de dunas. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.....	46
Figura A6 - Mapas dos comprimentos de cristas, discretizados em três classes definidos pelo histograma (canto superior a direita). A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.....	48
Figura A7 - Mapas com menores e maiores densidades de defeitos de crista dos campos de dunas A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.....	50
Figura A8 - Mapas dos índices de sinuosidade de dunas. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.....	51
Figura A9 - Correlações dos dados de espaçamento intercristas e densidade defeitos de crista, com o coeficiente de correlação Pearson (ρ) (no canto superior direito) para cada campo de dunas. Os pontos rosas representam maiores concentrações de dados, os azuis representam média concentrações, e os cinzas, baixas concentrações. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.....	59

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

Ai - Elevação do fundo sedimentar

BMU - *Best Matching Units*

CC – Comprimento da crista

CLR – Comprimento da linha reta

D - Profundidade

DEPr - Deriva eólica potencial resultante

DEPt - Deriva eólica potencial total

E - Altura eólica de equilíbrio

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC – Ilha do Caju

IDW – Ponderação do Inverso da Distância

Km² – Quilometro quadrado

LM – Lençóis Maranhenses

MDS – Modelo Digital de Superfície

mm - milímetros

MMA – Ministério do Meio Ambiente

nD - n-dimensional

NRM – Nível relativo do mar

PLM – Pequenos Lençóis Maranhenses

SOM – *Self Organizing-Maps*

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TT – Tutóia

V - Volume colocado em desequilíbrio pela elevação do NRM

Vi - Volume de areia deslocado pelo vento

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1	Localização geográfica da área de estudo	2
2.	Objetivos	4
2.1	Gerais	4
2.2	Específicos	4
3.	Fundamentação teórica	5
3.1	Dunas e sistemas eólicos	5
3.2	Classificação dos sistemas eólicos costeiros baseados em modelos dos campos dunares brasileiros	6
3.3	Complexidade em sistemas eólicos e parâmetros morfoplanimétricos 10	
3.4	Evolução dos sistemas eólicos costeiros	12
3.5	Controles de campos de dunas costeiros	13
3.5.1	Clima	13
3.5.2	Variações do nível relativo do mar (NRM)	14
3.5.3	Fisiografia	17
3.6	Self-Organizing Maps (SOM)	17
4.	Caracterização da área de estudo	19
4.1	Clima	19
4.2	Lençóis Maranhenses	21
4.3	Pequenos Lençóis Maranhenses	21
4.4	Tutóia	22
4.5	Ilha do Caju	22
5.	Materiais e métodos	23
5.1	Estudo dos parâmetros morfoplanimétricos	23
5.1.1	Base de dados cartográficos	23
5.1.2	Mapas de parâmetros morfoplanimétricos	24

5.2	Treinamento do algoritmo de classificação semiautomatizada	28
5.2.1	Base de dados cartográficos	28
5.2.2	Delimitação de duna e não-duna	29
5.2.3	Confecção do banco de dados para o treinamento do algoritmo ...	30
5.2.4	Treinamento por Self-Organizing Maps	31
5.2.5	Análise exploratória dos dados treinados	31
6.1	Resultados do artigo	33
1.	Introdução	34
2	Contexto regional da área de estudo	36
3	Materiais e métodos	39
3.1	Base cartográfica de sensores remotos	39
3.2	Mapas de parâmetros morfoplanimétricos	39
4	Resultados	41
4.1	Altimetria	41
4.2	Espaçamento intercristas	43
4.3	Orientação de cristas	44
4.4	Comprimento de crista	46
4.5	Defeitos de crista	48
4.6	Índice de sinuosidade de crista	50
5	Discussão	51
5.1	Parâmetros morfoplanimétricos e saldo (influxo/efluxo) sedimentar	51
5.1.1	Lençóis Maranhenses (LM)	52
5.1.2	Pequenos Lençóis Maranhenses (LM)	53
5.1.3	Tutóia (TT)	55
5.1.4	Ilha Do Caju (IC)	57
5.2	Condições limites eólicos costeiros	58
6	Conclusões	61
7	Agradecimento	61
8	Referências	62
6.2	Resultados parciais do treinamento do algoritmo	66

1. Treinamento do algoritmo	66
2. Considerações finais do treinamento do algoritmo	69
7. Considerações gerais da dissertação	70
Referências.....	71

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado está estruturada de acordo com as normas do Programa de Pós-Graduação em Geologia, nas quais os resultados da pesquisa devem ser apresentados na forma de um artigo científico, que contém os dados mais essenciais apresentados na parte inicial da dissertação.

No primeiro capítulo, introdução, são apresentadas as justificativas e as hipóteses da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta dois objetivos gerais distintos, um para abordagem metodológica e outro de aplicação, além dos objetivos específicos.

O terceiro capítulo contém a fundamentação teórica e aborda conceitos, termos e teorias utilizados no desenvolvimento da pesquisa, feitos por meio da revisão bibliográfica através da consulta de livros, teses, dissertações e, principalmente, artigos científicos sobre temas com estudos de sistemas eólicos costeiros, classificações das feições eólicas baseadas nas feições encontradas nos campos de dunas brasileiros, desafios na complexidade do estudo e entendimento e, as aplicações já feitas sobre estudos de abordagens de caráter quantitativo.

O quarto capítulo compreende à caracterização da área de estudo com a compilação das informações prévias essenciais para a pesquisa.

O quinto capítulo é dividido em duas partes com os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento dos dois objetivos gerais distintos.

O sexto capítulo também é dividido em duas partes, a primeira aborda os resultados sobre os estudos dos parâmetros morfoplanimétricos como método para a interpretação das condições limites eólicos costeiros. Esses resultados foram finalizados e são apresentados no formato de um artigo, o qual pretende ser submetido na revista *Geomorphology* (ISSN: 0169-555X). A segunda parte compreende aos resultados iniciais obtidos com o treinamento do algoritmo SOM capaz de extrair de forma semiautomática as dunas em imagens óticas de sensores remotos. Porém, esses dados não foram finalizados e com isso é apresentado somente o resultado parcial desse estudo, o qual se pretende finalizar em uma etapa posterior.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões gerais da pesquisa e finaliza-se a dissertação, no oitavo capítulo, com as referências que foram utilizadas no decorrer de toda a pesquisa.

1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre sistemas eólicos costeiros têm sido frequentemente realizados no Brasil nas últimas décadas, com aumento considerável nos últimos anos (Bigarella 1972, Martinho *et al.*, 2006, 2008, Sawakuchi 2006; Giannini 2007, Giannini *et al.*, 2007, 2011, 2014, Mendes *et al.*, 2015, Hilbert *et al.*, 2015, Guedes *et al.*, 2013, 2017). Os trabalhos mais comuns sobre os campos de dunas da costa brasileira possuem abordagens com caráter mais qualitativos como, por exemplo, estudos geomorfológicos (Martinho *et al.*, 2008, Tomazelli *et al.*, 2008), morfodinâmicos (Giannini *et al.*, 2011, Hilbert *et al.*, 2015), sedimentológicos (Hilbert *et al.*, 2015), geocronológicos (Tsoar 2005, Giannini *et al.*, 2007, Guedes *et al.*, 2013, Mendes *et al.*, 2015, Guedes *et al.*, 2017) e temáticas que abrangem escalas mais regionais como o trabalho sobre sistemas deposicionais eólicos do Quaternário costeiros no Brasil por Giannini (2007).

Os estudos sobre os sistemas eólicos de caráter quantitativos podem ser realizados a partir das interpretações obtidas pelos parâmetros morfoplanimétricos (Kocurek & Ewing 2005, Ewing *et al.*, 2006, Kocurek *et al.*, 2010, Ewing *et al.*, 2015; Hilbert *et al.*, 2015). Tais parâmetros representam informações espaciais das dunas mais comuns, tais como: espaçamento intercristas, comprimento de crista, orientação de crista e defeitos de crista (Ewing *et al.*, 2006).

Os parâmetros morfoplanimétricos são extraídos a partir de técnicas manuais que envolvem sua interpretação em imagens de sensores remotos (Ewing *et al.*, 2006, Beveridge *et al.*, 2006, Derickson *et al.*, 2008, Ewing & Kocurek 2010, Hilbert *et al.*, 2015). A extração manual desses parâmetros é vista como “convencional”, uma vez que o processo manual de extração se torna extremamente trabalhoso em campos de dunas de grandes extensões, a exemplo dos Lençóis Maranhenses que compreende o maior campo de dunas costeiro sul americano, situado na região nordeste do Brasil. E, a partir dessa problemática surge a necessidade da elaboração de um algoritmo capaz de realizar a extração automática ou semiautomática de dunas a partir de técnicas com redes neurais, como os mapas auto-organizáveis.

Esses parâmetros morfoplanimétricos são posteriormente usados como base para a análise e entendimento das condições limites dos sistemas eólicos como

regime de vento, aporte sedimentar, geometria da área fonte, limites geométricos do sistema eólico e condições antecedentes (Ewing & Kocurek 2010). Esses estudos baseados na análise quantitativa das dunas por meio dos parâmetros morfoplanimétricos são ainda incipientes e poucos frequentes no Brasil (Hilbert *et al.*, 2015).

A costa maranhense, nordeste do Brasil, abriga campos de dunas de diferentes tamanhos, que inclui dois dos maiores campos de dunas do Brasil: Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis Maranhenses e outros menores como o de Tutóia e da Ilha do Caju. Por estarem regionalmente próximos, muitas das variações das condições limites, como clima/paleoclima e variações do nível relativo do mar, afetaram a evolução dos campos de dunas dessa região de forma homogênea. Entretanto, esses campos de dunas possuem características distintas (Hilbert *et al.*, 2015), o que sugere que fatores locais tenham forte influência nos padrões de dunas o que torna a região um bom campo de estudo para a análise da influência dos fatores locais nos padrões de distribuição das feições eólicas.

1.1 Localização geográfica da área de estudo

Na região costeira do Maranhão, entre a baía de São José e a foz do rio Parnaíba estão localizados os maiores campos de dunas ativos da costa brasileira, os quais apresentam acreção progressiva em área de leste para oeste (Hilbert *et al.*, 2015, Guedes *et al.*, 2017) e, assimetria pronunciada, com a parte leste que avança mais ao interior que a oeste (Giannini *et al.*, 2007). Os principais campos de dunas abordados nesse trabalho são: (i) Lençóis Maranhenses; (ii) Pequenos Lençóis Maranhenses, (iii) Tutóia; e (iv) Ilha do Caju, com áreas de aproximadamente 1000 km², 150 km², 40 km² e 30 km², respectivamente (Figura 1).

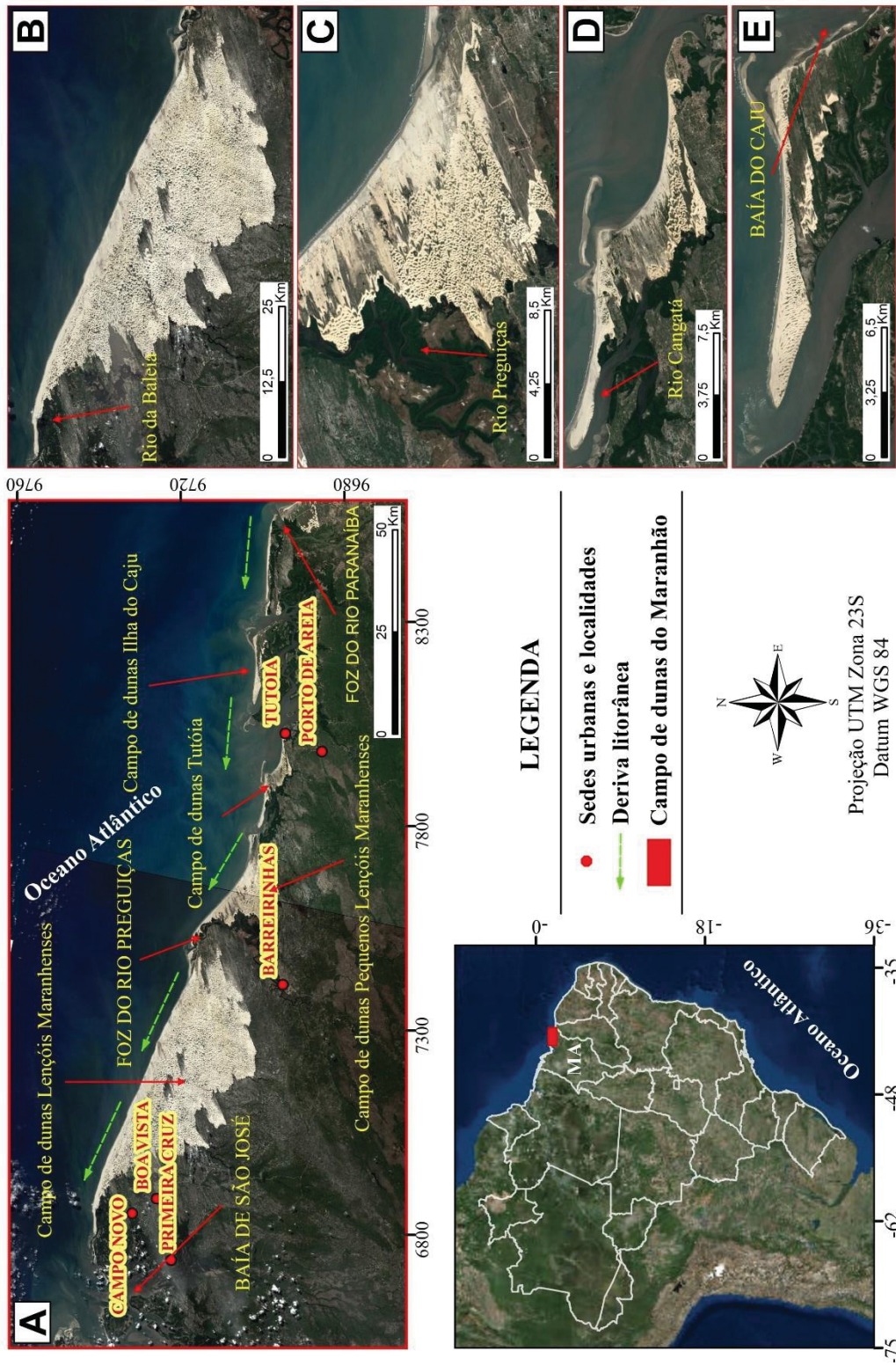


Figura 1 – A) Mapa regional apresentando os campos de dunas de estudo situados no estado do Maranhão. B) Lençóis Maranhenses. C) Pequenos Lençóis Maranhenses. D) Tutóia. E) Ilha do Caju.

2. OBJETIVOS

2.1 Gerais

A dissertação possui dois objetivos, um de caráter metodológico e outro de aplicação:

- Propor uma sistemática de mapeamento das cristas de dunas em sistemas eólicos a partir de métodos semiautomatizados.
- Interpretar a dinâmica eólica costeira dos quatro principais campos de dunas do Maranhão a partir da análise quantitativa dos parâmetros morfoplanimétricos, extraídos manualmente, em resposta às condições limites de sistema eólicos costeiros.

2.2 Específicos

Para cumprir os objetivos gerais são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar quais bandas óticas de sensores remotos são mais eficientes para o treinamento de um algoritmo capaz de extrair as dunas de forma semiautomática;
- Obter os parâmetros morfoplanimétricos de todos os quatro campos de dunas, extraídos manualmente;
- Correlacionar os parâmetros e verificar quais possuem relação direta ou inversa;
- Interpretar a variação espacial dos parâmetros morfoplanimétricos com o enfoque na análise das condições limites de sistemas eólicos costeiros;
- Estabelecer e validar os parâmetros morfoplanimétricos mais e menos representativos na abordagem com enfoque nas condições limites eólicos costeiros.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Dunas e sistemas eólicos

O termo “duna” foi denominado por Bagnold (1941) que define como uma quantidade de areia capaz de se locomover por ação do vento e que independe de qualquer feição da superfície para se depositar e formar. Mais tarde McKee (1979) e Carter (1988) simplificaram essa definição e descreveram as dunas como o acúmulo dos sedimentos em forma de morro ou cadeia, depositados através do vento perpendicular ou oblíquo à orientação da duna, apresentam estrutura de barlavento suave e sotavento íngreme. As dunas são encontradas em todo o mundo (Figura 2), em ambientes com o aporte sedimentar e vento efetivo (Martínez *et al.*, 2004). Essas, por sua vez, podem apresentar dimensões e morfologias variadas, desde metros até quilômetros de extensão. Estimam-se que os campos de dunas cubram uma área de 5.000.000 km², que cerca de 99% desses campos são desérticos e apenas 1% é do tipo costeiro (Martínez *et al.*, 2004, Tsoar 2004). Os campos de dunas são encontrados em várias latitudes e possuem características marcantes por conta da sua ampla distribuição e diversidade ecológica (Pinto 2015).

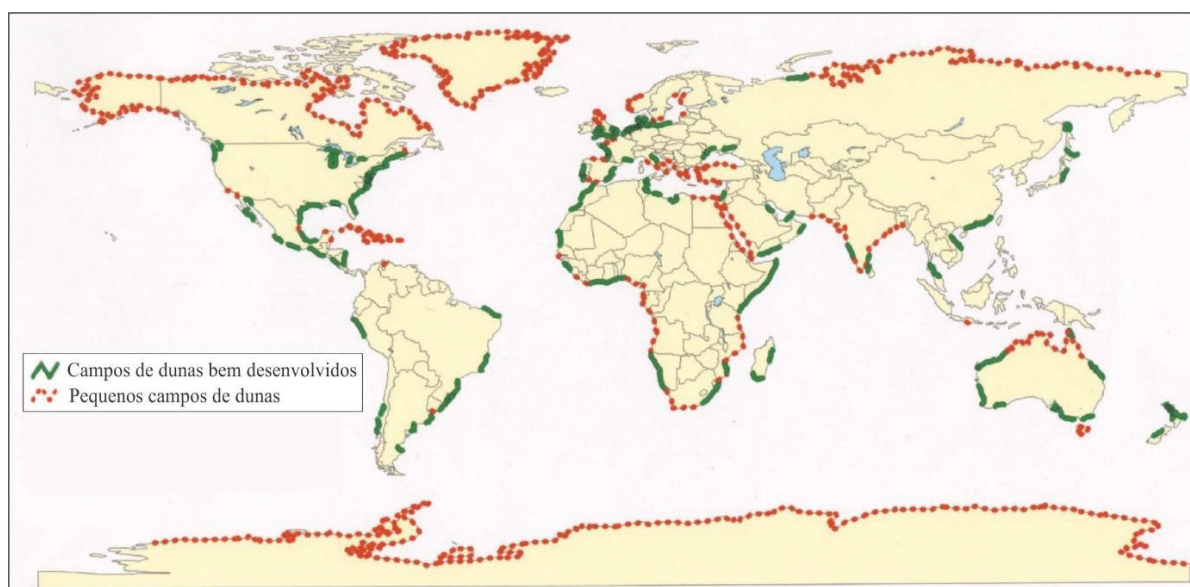


Figura 2 - Distribuições dos campos de dunas costeiras bem desenvolvidos e pequenos campos ao longo do planeta. Fonte: adaptado de Martínez *et al.* (2004).

3.2 Classificação dos sistemas eólicos costeiros baseados em modelos dos campos dunares brasileiros

Diversas classificações de tipos de dunas eólicas já foram propostas até o presente momento. A primeira tentativa foi feita por Melton (1940) que classificou dunas eólicas baseadas nos modelos de ocorrências norte-americanos. Posteriormente, Bagnold (1941) propôs uma classificação específica para as dunas desérticas.

No seu princípio, as classificações eram feitas a partir de observações por fotos aéreas dos ambientes com campos de dunas costeiros e desérticos (Melton 1940). Pela falta de estudos específicos, os autores não diferenciavam esses dois ambientes (Martinho 2008). Posteriormente, alguns autores propuseram trabalhos sobre a formação, classificação e a influência da presença ou não da vegetação nas dunas costeiras (McKee 1979, Hesp 1983, Pye 1983, Semeniuk *et al.*, 1989).

As feições eólicas são classificadas em dois grupos: as dunas livres e/ou “campo transgressivo” (Gardner 1955) e as dunas vegetadas ou “semifixas” (Claudino-Sales & Peulvast 2002), podendo um campo de dunas ter a ocorrência dos dois grupos. O modelo conceitual para a classificação de depósitos eólicos ativos utilizado nesse estudo é baseado no proposto por Giannini *et al.* (2005) e Giannini (2007), que subdividem as feições eólicas em influenciadas ou não por vegetação. Apesar desses dois ambientes serem diferentes, Giannini & Santos (1994) afirmam que é possível a progressão de um tipo dunas para outro, o que dependerá do aporte do sedimento e da evolução da vegetação.

As feições eólicas vegetadas descritas por Giannini (2007) são: dunas frontais, rupturas de deflação, dunas parabólicas, rastros lineares residuais, retrocordões, *nebkhas*, planície interdunar, montes residuais e cordões de precipitação. Já para os campos de dunas sem vegetação descrito pelo mesmo autor são: franjas de areia eólica, protodunas, dunas transversais, extensos lineares, depressões interdunas e os lobos deposicionais.

Dentre todas essas feições descritas acima, as principais delas (em exceto as feições E, F e I) encontradas nos campos de dunas brasileiros são sintetizadas na (Figura 3) proposta por McKee (1979).

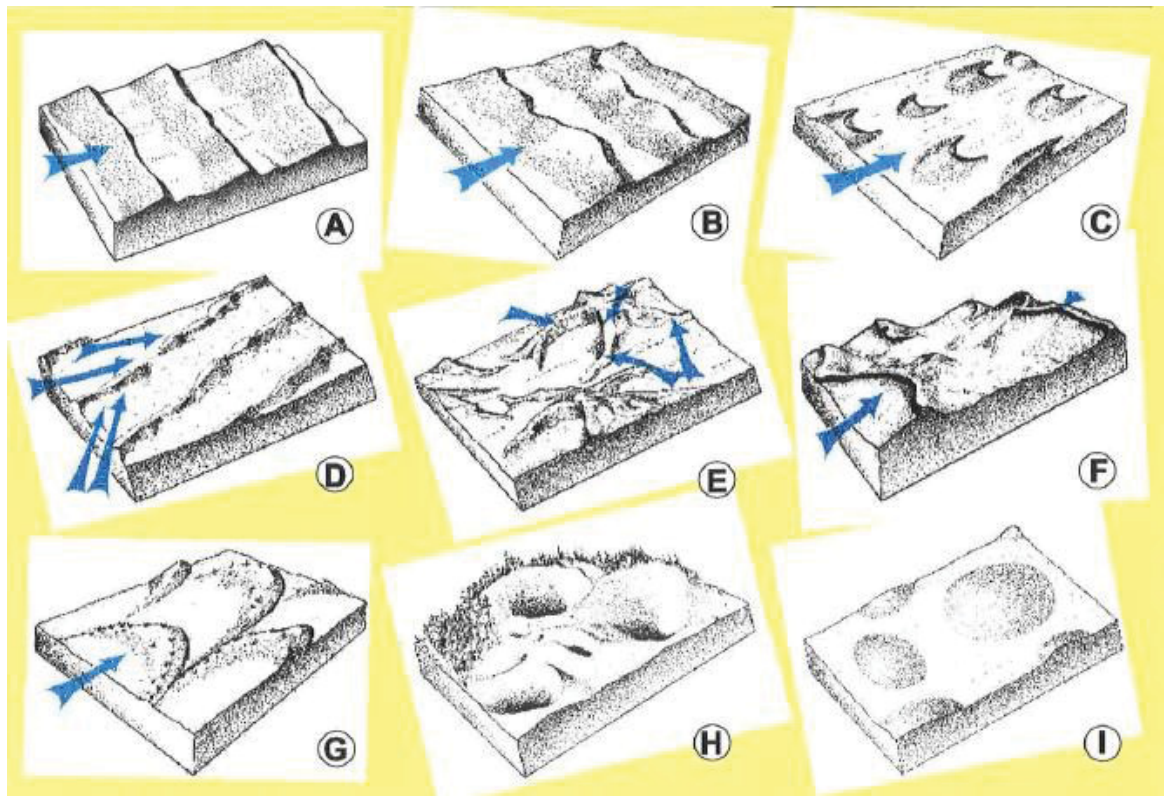


Figura 3 - Principais tipos de dunas eólicas. A) transversal; B) barcanóide; C) barcanas; D) linear; E) estrela; F) reversa; G) parabólica; H) ruptura de deflação ou *blowout*; e I) dômica. Fonte: McKee (1979), Giannini (2007).

A relação entre o aporte sedimentar e regime de vento dos depósitos eólicos costeiros foi sintetizada por Giannini (2007). As dunas barcanas e cordões crescênticos compostos por dunas barcanóides e transversais são típicos de regime de vento pouco complexo, normalmente unidirecional, enquanto as dunas estrelas (comuns em ambientes desérticos) e lineares são formadas por ventos multidirecionais (Figura 4).

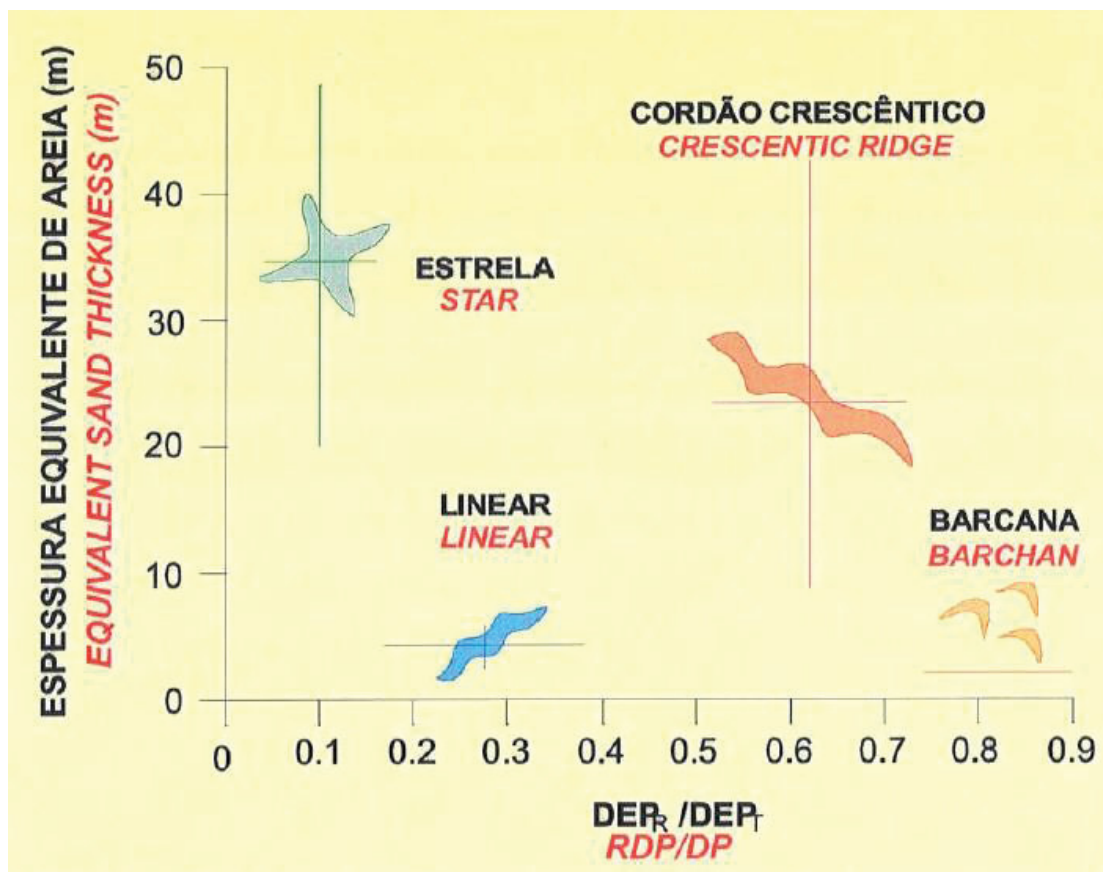


Figura 4 - Os quatro principais tipos de dunas e a sua relação entre os parâmetros morfodinâmicos (aporte sedimentar x complexidade do regime eólico) representados pela relação entre a magnitude do vetor deriva eólica potencial resultante, ou DEPR, e a deriva eólica potencial resultante, ou DEP_R, e a deriva eólica potencial (escalar) total, ou DEP_T. Adaptado de: Wasson & Hyde (1983), Giannini *et al.* (2007).

O sistema eólico pode ser comparado como “uma caixa”, cujo volume e geometria são determinados por entradas e saídas e por variáveis capazes de exercer controle sobre essas entradas e saídas. As entradas corresponderiam ao influxo (deriva eólica efetiva) e as saídas, ao efluxo (Mainguet & Chemin 1983, Kocurek & Havholm 1993). Giannini (2007) afirma que para se ter a formação de um sistema eólico costeiro, é necessário que o saldo influxo/efluxo seja positivo.

O modelo conceitual com os estágios morfodinâmicos dos sistemas eólicos costeiros, baseados em modelos de sistemas eólicos brasileiros, elaborado por Giannini (2007) discretizou 8 diferentes estágios, que leva em consideração a relação entre o saldo sedimentar (influxo-efluxo) e o espaço de acumulação crescente de 1 a 8 (Figura 5). A partir disso, os autores Giannini *et al.* (2014) definiram três grupos com

elementos morfológicos de diferentes posições espaciais dentro do sistema eólico e as suas associações.

O primeiro elemento corresponde ao estoque inicial, composto por dunas frontais com ou sem *blowouts* associados, protodunas, lençóis de areia e dunas sem vegetação de orientação transversal ao vento. O segundo corresponde às deflações, compostas por rupturas de deflação, rastro lineares residuais, retrocordões e dunas parabólicas, compostas por dunas barcanas e cadeias barcanóides. E, por último, os elementos de cavalgamento e de avanço do campo, compostas dunas barcanas, cadeias barcanóides, cordões de precipitação e lobos deposicionais (Giannini *et al.*, 2014). Esses três grupos possuem associações entre si e apresentam uma posição definida dentro do sistema eólico, que constituem assim, associações de fácies morfológicas.

A associação praia-duna (A) é composta pelos elementos de suprimento inicial. A associação planície deflacionar (B) reúne os elementos de deflação. Os elementos de cavalgamento e de avanço (C) definem a associação campo de dunas livres. Para Giannini *et al.*, (2014), os diferentes equilíbrios o saldo influxo/efluxo definem as relações entre as associações de fácies morfológicas em quatro tipos (Figura 5).

O tipo A corresponde ao equilíbrio alcançado na associação praia-duna. O A-B, corresponde ao equilíbrio entre as associações praia-duna e planície de deflação. O A-B-C corresponde ao equilíbrio entre as associações praia-duna, planície de deflação e campo de dunas livre. E por último, o tipo A-C, o qual corresponde ao equilíbrio direto entre as associações praia-duna e campo de dunas livre. Esse último tipo representa uma situação de desequilíbrio influxo-efluxo (Giannini 2007, Giannini *et al.*, 2014). Essas quatro relações de equilíbrio são subdivididas em oito tipos morfodinâmicos de sistema eólico, numerados de 1 a 8 em grau crescente de relação entre saldo eólico e espaço de acumulação, de acordo com os tipos de feições eólicas presentes. Modificações no equilíbrio entre influxo e efluxo, como aporte sedimentar e espaço de acomodação, levam a evolução do sistema ao longo do tempo. Desequilíbrios menores, próximos ao equilíbrio, são autorregulados pelo sistema enquanto desequilíbrios maiores são respondidos pelo sistema com auto-organização e transformação de um tipo de sistema eólico em outro.

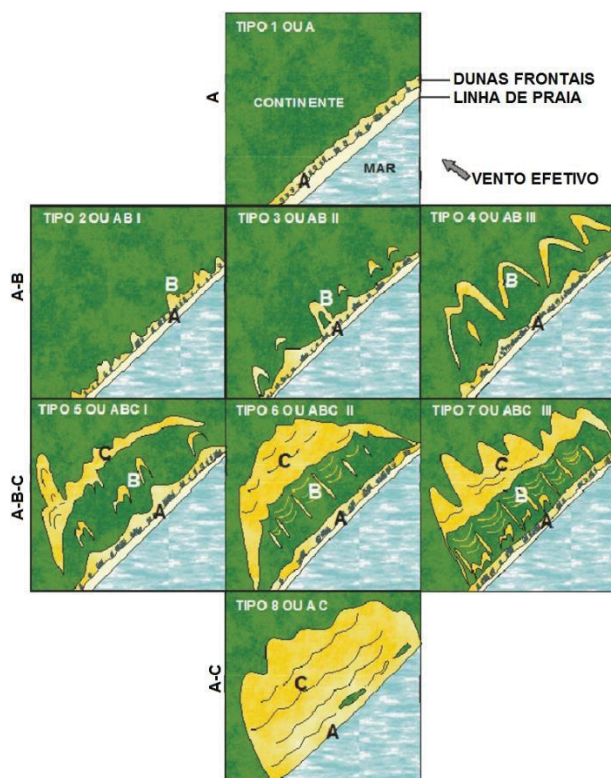


Figura 5 - Principais tipos de sistemas eólicos costeiros dos modelos brasileiros, sob dinâmica de vento efetivo transversal à linha de costa. A, B e C são associações de elementos morfológicos: praia-duna, planície deflacionar e campo de dunas livres, respectivamente. Do tipo 1 ao 8, tem-se crescimento no saldo sedimentar eólico relativo (aporte eólico/espaco de acumulação) (Giannini *et al.*, 2014).

3.3 Complexidade em sistemas eólicos e parâmetros morfolanimétricos

O estudo e interpretação de alguns tipos de depósitos eólicos conhecidos no mundo são vistos como sistemas de alta complexidade de entendimento evolutivo (Kocurek & Ewing 2005). Nesses estudos são compreendidos dois padrões de auto-organização em campos de dunas. O primeiro padrão de auto-organização é o “simples”, entendido como bem definido e de fácil interpretação evolutiva, resultante de ambiente sem alterações nas condições limites ao longo do tempo. Há também o padrão “complexo” que ocorre com mais frequência. Os padrões complexos são formados a partir de vários padrões simples sobrepostos entre si, associados a

resultados de variações nas condições limites e refletem na mudança no aporte sedimentar e no regime de vento (Kocurek & Ewing 2005).

As distribuições espaciais e as variações nas tipologias das feições eólicas nos campos de dunas são os exemplos mais “eloquentes” de padrões na natureza e são resultantes da auto-organização em sistemas complexos (Kocurek & Ewing 2005, Ewing *et al.*, 2006, Wilkins & Ford 2007). A partir disso, surgiu a necessidade da utilização de modelos computacionais para a interpretação dos padrões de dunas, com o intuito de analisar a influência das condições limites do sistema (Werner 1995, Bishop *et al.*, 2002, Ewing & Kocurek 2010). Esses padrões de auto-organização surgem nos sistemas eólicos como resultado das condições limites: regime de vento, aporte sedimentar, geometria da área fonte, limites geométricos do sistema eólico e condições antecedentes (Ewing & Kocurek 2010). Os limites geométricos do sistema eólico representam a área fonte dos sedimentos, e são divididos em três: fontes lineares, exemplificadas por praias. Fontes planas se referem ao retrabalhamento eólico de sedimentos disponibilizados pela perda da vegetação ou por sedimentos disponíveis dentro das planícies interdunares em períodos em que as planícies secam (Ewing & Kocurek 2010, Hilbert *et al.*, 2015). E, por último, fontes pontuais, que correspondem uma região pontual como uma área estreita a montante ou uma brecha de vento onde areia é fornecida para o campo de dunas (Ewing & Kocurek 2010). As condições antecedentes representam variáveis que podem influenciar na delimitação dos limites geométricos do campo de dunas, como vegetação, nível freático próximo à superfície e topografia da região (Ewing & Kocurek 2010).

Seguindo o desafio da interpretação e entendimento dessa temática, Ewing *et al.* (2006) definiram um método de análise do sistema eólico a partir de quatro parâmetros, conhecidos como parâmetros morfoplanimétricos: espaçamento intercristas ou interdunas, comprimento de crista, orientação de crista e defeitos de crista (Figura 6). Tal método visa uma abordagem quantitativa dos padrões de dunas para interpretação das condições limites dos campos dunares.

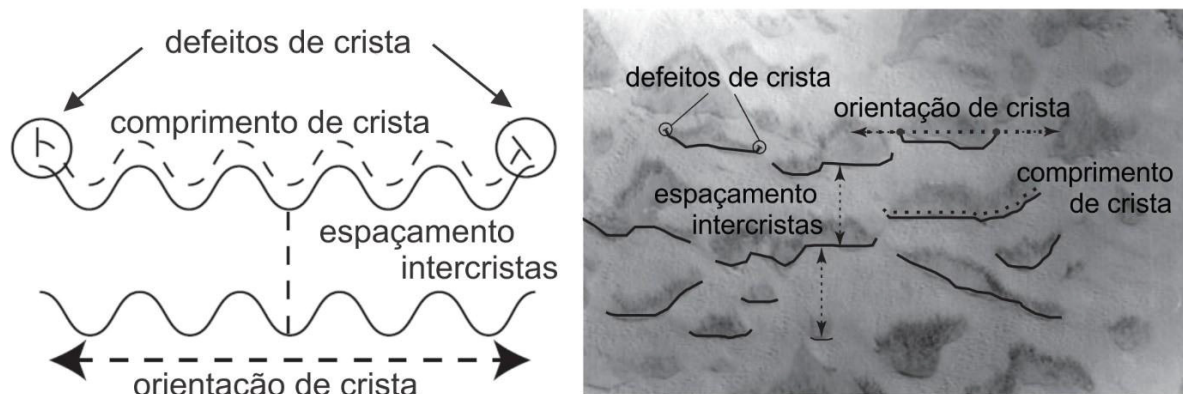


Figura 6 - Diagrama com representações dos parâmetros morfoplanimétricos das dunas do tipo crescênticas. Adaptado de Ewing *et al.* 2006 e Beveridge *et al.* 2006.

O espaçamento intercristas é a distância entre duas cristas de dunas, medido na direção da migração da duna. O comprimento de crista é a distância ao longo da crista, entre as extremidades dos defeitos ou terminações de dunas. A orientação de crista é a disposição geográfica da duna no espaço. Os defeitos de crista são definidos como as terminações das extremidades das dunas (Ewing *et al.*, 2006).

3.4 Evolução dos sistemas eólicos costeiros

Os padrões espaciais de distribuição de dunas são entendidos como a representação de determinado estágio de evolução ou maturidade do sistema eólico no tempo (Ewing *et al.*, 2006). São conhecidos dois cenários de evolução e maturidade nos campos de dunas. O primeiro propõe uma alta evolução do campo com interações construtivas entre os defeitos de dunas (Kocurek *et al.*, 2010). Essas interações são fusões entre dunas e são ocasionadas pela dinâmica de migração, que refletem num aumento do espaçamento intercristas e no comprimento. Proporcionam a diminuição da densidade de defeitos e na precisão da orientação uniforme das cristas em função do tempo (Ewing *et al.*, 2006).

O segundo cenário representa o primeiro cenário menos evoluído, com dunas menos interagentes entre si, refletem no baixo espaçamento intercristas, alta densidade de defeitos e menores extensões das dunas, com dunas mais aglomeradas

e truncadas dentro do campo (Werner & Kocurek 1999, Kocurek & Ewing 2005, Ewing *et al.*, 2006, Derickson *et al.*, 2008, Kocurek *et al.*, 2010).

3.5 Controles de campos de dunas costeiras

Os fatores controladores das condições limites de sistemas eólicos costeiras podem ser resumidos em três: clima, nível relativo do mar e fisiografia do campo. Esses fatores influenciam no aporte sedimentar e no espaço de acumulação e são determinados por controladores geológicos, climáticos e oceanográficos (Lancaster 1995, Sawakuchi 2006, Giannini 2007).

3.5.1 Clima

A quantidade de chuva, vento e aporte sedimentar são os principais fatores na formação e distribuição dos depósitos eólicos costeiras (Wasson & Hyde 1983, Lancaster 1995, Giannini 2007).

Nos campos de dunas costeiras o clima pode influenciar na disponibilidade de sedimentos na área fonte (praia), onde maiores taxas pluviométricas dentro do continente proporcionam maiores taxas de erosão continental e capacidade de transporte fluvial até a linha de costa que acarretam, assim, na maior disponibilidade de sedimentos para o sistema eólico.

Nas regiões costeiras, a disponibilidade sedimentar está sob influência da deriva litorânea longitudinal, controladas por ondas e, indiretamente, pelos regimes de ventos. Para Giannini (2007), terminações ou encontro de células de transporte litorâneo longitudinais são locais de favorecimento para o desenvolvimento dos campos de dunas costeiras. Entretanto, para o mesmo autor, se o transporte litorâneo ou o vento não é muito efetivo, a progradação será intensa, que desfavorece o estabelecimento de campos de dunas costeiras.

As taxas pluviométricas influenciam de dois modos distintos dentro dos campos de dunas: altos níveis de chuva favorecem o desenvolvimento da vegetação, que criam obstáculos físicos e, de certa forma, dificultam o transporte eólico, além de tornarem os sedimentos mais coesos para transporte (Pye 1980).

O vento e a direção do vento são os fatores predominantes para estabelecer o tipo de dunas (McKee 1979, Ewing & Kocurek, 2005) e para a estabilização de dunas pela vegetação em regiões com precipitações médias maiores de 800 mm por ano (Tsoar 2005, Yizhaq *et al.*, 2008). Até a cota de 800 mm ao ano, as variações nas quantidades de chuvas seriam o principal controlador para o surgimento e desenvolvimento da vegetação que estabiliza as dunas. Para Pye & Tsoar (1990), a precipitação é mais influenciadora nas dunas de interiores e menos nas costeiras, já que nesta última, os ventos são consideravelmente mais fortes do que os do interior do continente.

3.5.2 *Variações do nível relativo do mar (NRM)*

As variações do NRM influenciam na geometria do sistema eólico costeiro, por estas ocasionarem variações na linha de costa e também no posicionamento da área fonte (praia). O nível relativo do mar também é controlador no nível freático, o qual influencia a disponibilidade de areia para o transporte eólico e a preservação dos depósitos (Giannini *et al.*, 2005).

Para Giannini (2007), o nível relativo do mar é talvez o mais “polêmico” dentre os fatores controladores de sedimentação eólica, dando este a lugar dois modelos opostos, conforme se associa à iniciação de campos de dunas ao NRM baixo (em queda) e alto (em elevação). De acordo com estes modelos, o cenário de regressão marinha favoreceria a formação dos campos de dunas costeiros por conta do retrabalhamento eólico dos sedimentos que ficariam expostos em uma grande área na plataforma (Figura 7) (Pye 1983, Lees 2006, Bateman *et al.*, 2010); e no rebaixamento do nível freático, por disponibilizar mais sedimentos para o sistema.

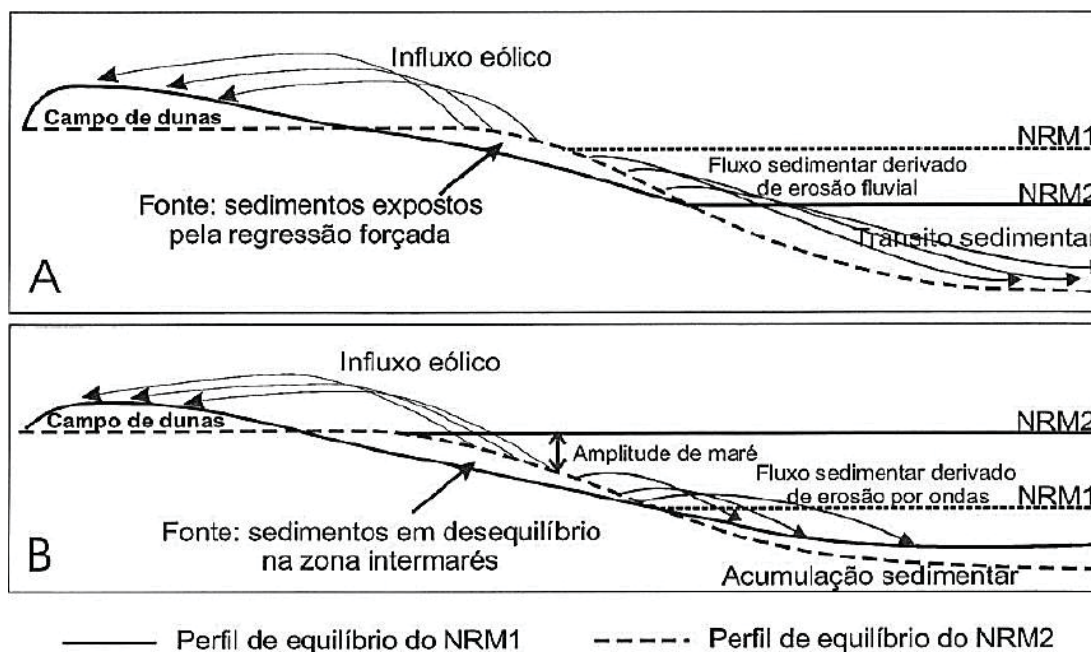


Figura 7 - Dinâmica dos cenários de sistemas eólicos e sua relação com o nível relativo do nível do mar. A) durante ou logo após a queda do NRM. B) durante a subida do NRM (Sawakuchi *et al.*, 2003).

Para Schofield (1975), a queda do nível relativo do mar ocasionaria o transporte de sedimentos de zonas mais profundas para zonas mais rasas para restabelecer o perfil de equilíbrio da superfície deposicional, em mecanismo recíproco ao postulado pelo princípio de Bruun (1962), para o caso de elevação do nível relativo do mar.

Em contrapartida, Giannini *et al.* (2007) discordam desse modelo e afirmam que a regressão marinha exporia os sedimentos aos “processos estabilizadores dos campos de dunas”, como: vegetação, cimentação precoce eodiagenética e processos pedogenéticos e, mesmo que na hipótese de que haja a formação dos campos de dunas, os mesmos seriam erodidos por conta da erosão subárea ocasionada pela formação de vales incisivos, ou seja, um evento de baixo NRM não é uma situação favorável para o desenvolvimento dos campos de dunas transgressivas.

Um segundo modelo, afirma que a subida do nível eustático seria a principal variável controladora do desenvolvimento dos campos de dunas costeiros (Cooper 1958, Giannini *et al.*, 2001, Lees 2006, Giannini 2007). Segundo os mesmos autores, a formação dos sistemas eólicos costeiros está diretamente relacionada à elevação do NRM, quando este cenário favoreceria a formação e o desenvolvimento de campo

de dunas costeiras em escala global, na qual a elevação do NRM geraria o aumento do espaço de acomodação na margem da bacia, resultado da mudança na posição da barreira (Roy *et al.*, 1994). Dados que são quase sempre respaldados por datações (Deevey & Flint 1957, McFarlan 1961).

A partir desse modelo, a elevação do NRM ocasionaria erosão costeira por remobilização do prisma praiar, como representa o princípio de Bruun (1962) (Figura 8). Os sedimentos colocados em desequilíbrio na zona intermarés (antepraia e pós-praia não-vegetada) ficariam disponíveis para transporte eólico, além de serem remobilizados para a zona submersa prevista por esse princípio. Assim parte destes sedimentos em desequilíbrio estariam disponíveis para serem transportados para o continente e formar os campos de dunas (Giannini 2007).

Este modelo, diferente do anterior, destaca que a fonte de suprimento de areia não se dissipa do campo de dunas e ocorre uma redução do espaço de acumulação, o que acresce o saldo influxo-efluxo no campo de dunas e desestimula o desenvolvimento da vegetação e processos pedogenéticos em faixas costeiras (Giannini 2007, Hilbert *et al.*, 2015, Guedes *et al.*, 2017). Para os mesmos autores, outra discordância com o modelo anterior remete ao potencial de preservação dos depósitos destes serem maiores, devido à subida do nível de base não favorecer à erosão subaérea.

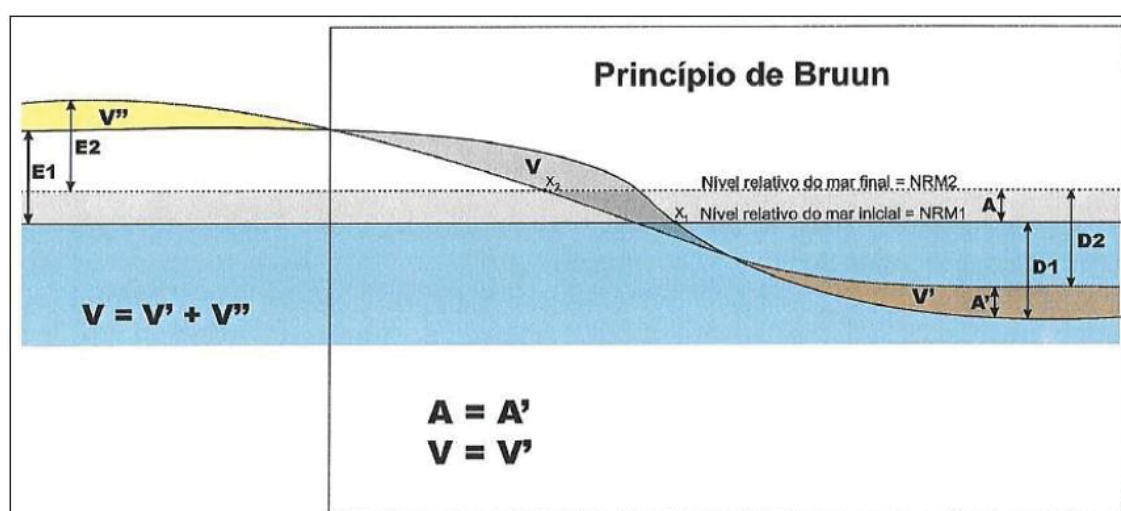


Figura 8 - Princípio baseado na formação do campo de dunas a partir da ascensão marinha (transgressão). A: elevação de NRM, Ai: elevação do fundo sedimentar, D: profundidade. E: altura eólica de equilíbrio, V: volume colocado em desequilíbrio pela

elevação do NRM, V_i : volume de areia deslocado pelo vento. Adaptado de Bruun (1962).

3.5.3 Fisiografia

A influência da fisiografia nos depósitos eólicos costeiros pode ser entendida de duas formas: a partir dos elementos fisiográficos da área emersa e a partir da plataforma continental.

Através de modelos matemáticos, Roy *et al.* (1994) propuseram uma correlação entre declive da plataforma continental interna (local onde se encontra um grande estoque sedimentar) e a remobilização desses sedimentos para a barreira costeira. De acordo com o modelo, as inclinações da plataforma entre 0,8 a 0,1° favorecem o acréscimo das barreiras arenosas costeiras, assim como na taxa de reciclagem de seus sedimentos, sem perdas costa afora (Roy *et al.*, 1994). Essa declividade é vista por Giannini (2007) como o parâmetro mais determinante nas características dimensionais e dinâmica de barreira.

A topografia tem grande influência na formação nos campos dunares, a partir da canalização dos ventos e na formação preferencial de dunas em zonas mais aplainadas (de baixo declive) (Pye & Tsoar 1990). Nas regiões costeiras, os campos de dunas ocupam preferencialmente as planícies (Hilbert *et al.*, 2015). Para os mesmos autores, alguns outros elementos fisiográficos também podem ser limitantes da área do sistema eólico, como: lagunas, rios e desembocaduras de rios. As desembocaduras dos rios atuam na alteração da área fonte do sistema eólico (praia), de forma a intervir na sua geometria e no seu aporte sedimentar. O efeito molhe hidráulico das desembocaduras bloqueia os sedimentos provenientes do transporte litorâneo, o que proporciona um incremento local da disponibilidade de sedimentos a barlar da desembocadura (Giannini 2007).

3.6 Self-Organizing Maps (SOM)

O *Self-Organizing Maps* (SOM) ou Mapas Auto-Organizáveis foram primeiramente propostos por Kohonen (1982). O termo "auto-organizáveis" se refere à habilidade de aprendizado não supervisionado, com diferentes aplicações em diferentes áreas das ciências e pode ser aplicado em problemas não-lineares de alta dimensionalidade (Mesquita 2002, Johnsson 2016).

Esse método inicialmente foi inspirado no córtex humano e é estruturado a partir de uma rede neural que apresenta um método com abordagens de múltiplas equações matemáticas capazes de analisar, visualizar e prever dados espaciais que têm como base os princípios de quantização vetorial e as medidas do vetor similaridade. Essas equações são feitas a partir de neurônios ou BMU. Os neurônios nesse trabalho podem ser entendidos como "*pixels*", correspondentes às assinaturas espectrais das bandas óticas.

No ambiente SOM, cada amostra é tratada como um vetor n-dimensional (nD) em um espaço amostral definido pelas variáveis desta amostra. Devido ao fato de tratar-se de uma análise não supervisionada, não é necessário o conhecimento prévio sobre os dados (Kohonen 2001).

Os mapas auto-organizáveis representam uma valiosa técnica de redução de dimensionalidade, onde os dados de entradas podem ser diversos atributos (variáveis) e o dado de saída (visualização) podem ser representados através de valores numéricos (matriz de correlação) ou através de representações gráficas como a Matriz-U e o *components plots*, estes dois últimos normalmente são bidimensionais. Uma das formas geométricas mais utilizadas na projeção dos mapas auto-organizados é o toróide, que possibilita interconexão de células do mapa sem efeitos de borda (Carneiro 2010).

A representação por meio da Matriz-U possibilita a visualização das proximidades entre neurônios mais similares, em termos da distância euclidiana. Esse dado gráfico é apresentado por meio de escala temperatura-cor e as cores frias (azuis) representam neurônios adjacentes com maior similaridade, enquanto as cores quentes (vermelhas) indicam maior distância de neurônios com maior dissimilaridade. Para auxiliar a representação gráfica, neurônios simulados alternados são adicionados à Matriz-U, e estes são coloridos conforme a distância dos neurônios adjacentes. Desse modo, neurônios com maiores similaridades (tons azuis)

separados por neurônios mais dissimilares (tons vermelhos) representam amostras pertencentes a “*clusters*” diferentes (Carneiro 2010).

Outra forma de representação e visualização dos neurônios em um mapa auto-organizado é por meio do *components plots*, representação pouco similar a Matriz-U. Os dados podem ser expressos novamente em uma escala temperatura-cor. Assim, baixos valores são mostrados em azul, enquanto que altos valores são representados em vermelho (Carneiro 2010).

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Clima

A área estudo é influenciada pelo posicionamento da feição atmosférica da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Figura 9). A ZCIT é definida por um conjunto de variáveis meteorológicas que atuam sobre os oceanos, como a convergência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste e a área de máxima temperatura da superfície do mar. Essa feição atmosférica controla a distribuição espacial e temporal da chuva e do vento na região (Melo *et al.*, 2009).

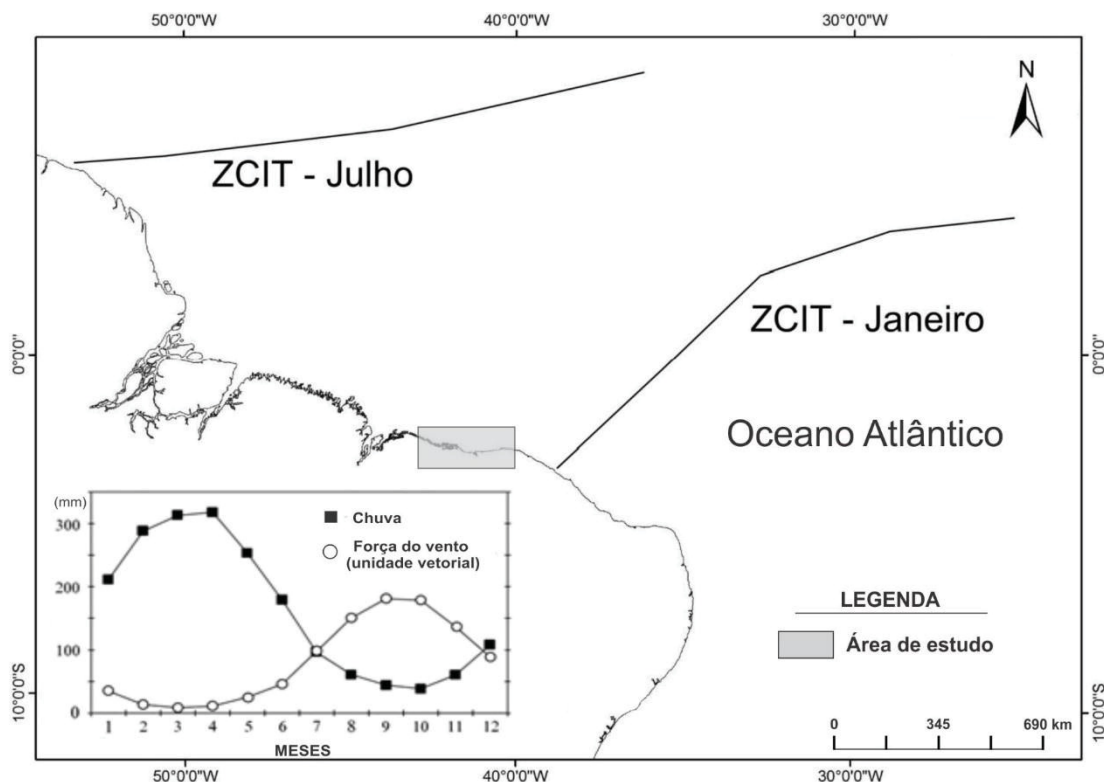


Figura 9 - Posicionamento da ZCIT ao longo dos meses do ano em relação a área de estudo e sua relação direta com a quantidade de chuva e intensidade de vento na região costeira nordeste da América do Sul. Adaptado de Tsoar *et al.* (2009), Guedes (2012) e Luna *et al.* (2012).

Os campos de dunas maranhenses estão situados sob clima sub-úmido, na zona equatorial tropical quente e apresentam temperatura média anual de 26,5 °C (Nimer 1989, IBGE 1992). Hilbert *et al.* (2015), em uma análise do regime de ventos a partir de dados *reanalysis* numa série de 1948 a 2014, obtidos de NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996), apontam que ventos de E e NE são mais frequentes na região. Ao longo do ano, as maiores taxas de precipitação ocorrem nos seis primeiros meses do ano (Jimenez *et al.*, 1999, Luna *et al.*, 2012), com uma média de 1480 mm (Tsoar *et al.*, 2009), a qual esta alta precipitação compreende ao período em que a ZCIT atua sobre a área de estudo (Figura 9). Nesse período também ocorre uma diminuição dos ventos provenientes de leste e nordeste (Tsoar *et al.*, 2009), e esta proporciona uma condição desfavorável ao transporte eólico (Guedes *et al.*, 2017). Já nos últimos seis meses do ano, a precipitação média fica em torno de 140 mm (Tsoar *et al.*, 2009), relacionada à ZCIT posicionada a norte da área de estudo, assim, favorece o

transporte eólico pelos ventos efetivos do leste e nordeste (Tsoar *et al.*, 2009, Guedes *et al.*, 2017).

4.2 Lençóis Maranhenses

O campo de dunas dos Lençóis Maranhenses (Figura 1) está localizado na região norte do estado do Maranhão, no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, entre a baía estuarina de São José e a foz do rio Parnaíba. Apresenta uma área maior a leste e é descrito como o maior campo de dunas costeiras quaternário da América do Sul (Gonçalves *et al.*, 2003, Guedes *et al.*, 2017), com uma área de aproximadamente 1000 km² de dunas transgressivas e com morfologias predominantes de cadeias barcanóides, barcanas e dunas parabólicas (Sawakuchi 2006, Hesp *et al.*, 2009, Luna *et al.*, 2012, Hilbert *et al.*, 2015). Na maior parte do campo são encontradas dunas livres e lagoas interdunares de água doce, as quais são inundadas durante os períodos de chuva (tanto nas regiões mais próximas à costa quanto mais ao interior) e podem cobrir até 40% do campo de dunas (Gonçalves *et al.* 2003, Parteli *et al.*, 2006, Sawakuchi 2006, Levin *et al.*, 2008, Hesp *et al.*, 2009, Luna *et al.*, 2012). Nas bordas do campo de dunas e em meio às dunas concentradas em áreas distintas são encontradas vegetações do tipo restinga, mangue, cerrado e campo cerrado (MMA/IBAMA 2003).

Segundo Gonçalves *et al.* (2003) e Santos (2008), as dunas transgressivas avançam gradativamente para o interior do continente pela ação de ventos unidirecionais NE (Luna *et al.*, 2012) e há uma taxa de migração de cerca de 10 a 15 m/ano. Os sedimentos que alimentam o campo de dunas são provenientes do rio Parnaíba e também da região leste da desembocadura do mesmo rio (Hilbert *et al.*, 2015).

4.3 Pequenos Lençóis Maranhenses

O campo de dunas Pequenos Lençóis Maranhenses (Figura 1) com uma área de aproximadamente 150 km², fica a leste dos Lençóis Maranhenses e a oeste do campo de dunas Tutóia, sendo os Pequenos Lençóis Maranhenses o segundo maior

campo de dunas do nordeste brasileiro. Apresenta assimetria muito pronunciada, com a frente sudeste que avança 12 km ao longo da direção do vento, enquanto o lado ocidental atinge menos da metade dessa distância (Hilbert *et al.*, 2015). O campo é delimitado a oeste pelo rio Preguiças, o qual bloqueia o avanço das dunas transgressivas na região mais ocidental, que resulta na formação de cadeias barcanóides, separadas das dunas barcanas por uma planície composta por *nebkhas*, protodunas e depósitos deflacionares residuais compostos por areia grossa e grânulos. Há presença de interdunas inundadas entre as dunas ativas ao longo de todo o campo (Hilbert *et al.*, 2015). Segundo os mesmos autores, há uma diminuição nos tamanhos das cristas de dunas de oeste para leste, diferentemente da tendência encontrada nos Lençóis Maranhenses.

4.4 Tutóia

O campo de Tutóia (Figura 1) é o terceiro maior do nordeste. É delimitado ao norte pela praia do Arpoador e ao sul pelo rio Cangatá e áreas de manguezais. Possui uma área de aproximadamente 40 km² de dunas transgressivas e chega a avançar até 4,5 km para o interior do continente (Hilbert *et al.*, 2015). Além disso, apresenta áreas deflacionares que chegam a ocupar até 22% do campo. Essas áreas deflacionares compostas por retrocordões e rastros lineares residuais dividem o campo em dois campos menores: um campo isolado mais a noroeste, em contato com a praia e vegetação de alto porte, a sul. O outro mais distal da praia, a sul, também em contato com a vegetação, corresponde à frente de avanço do campo com dunas do tipo barcanas e cadeias barcanóides (Hilbert *et al.*, 2015). Assim como nos Pequenos Lençóis Maranhenses, há uma diminuição nos tamanhos das cristas de dunas de oeste para leste, com ventos efetivos provenientes do NE (Hilbert *et al.*, 2015).

4.5 Ilha do Caju

O campo de dunas Ilha do Caju (Figura 1) apresenta uma área de aproximadamente 30 km², está localizado a leste dos demais campos de dunas e é o

campo de menor área entre os quatro principais. É delimitado a leste pela baía do Caju e a oeste e a sul pela baía da Melancieira. As principais ocorrências de dunas são as do tipo barcanas isoladas e barcanóides, com migração para W-SW, e na região norte-nordeste do campo há ocorrências de cadeias barcanóides. Já no sudeste as dunas barcanas são limitadas da linha de costa por uma área deflacionar com a presença de retrocordões (Hilbert *et al.*, 2015).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse tópico contém duas etapas diferentes e essenciais para o suprimento de cada objetivo geral: a primeira compreendeu ao procedimento utilizado para a geração dos mapas dos parâmetros morfoplanimétricos a partir de técnicas manuais. E, a segunda corresponde ao procedimento para o treinamento e elaboração do algoritmo de classificação semiautomatizada de dunas, a partir do método não-supervisionado *Self-Organizing Maps* (SOM).

5.1 Estudo dos parâmetros morfoplanimétricos

5.1.1 Base de dados cartográficos

Para a extração manual dos parâmetros morfoplanimétricos foi usada a imagem ótica com resolução espacial de 0,5 metro que registra o cenário costeiro do dia 10 de setembro de 2016, pertencente ao banco de dados da DigitalGlobe e adquirida pelo satélite *GeoEye*. Essa imagem foi acessada abertamente na plataforma *online* do Google Earth[®]. Em conjunto com essa imagem ótica também foram adquiridas imagens do espectro micro-ondas (Banda-L) de resolução espacial de 30 metros com o modelo digital de superfície (MDS), obtidas no banco de dados TOPODATA (<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>), da cena 02S435, referente à área de estudo. As imagens TOPODATA são modelo digitais com representação de superfície, resultado de produtos de interpolação, aprimoramento e correções das

imagens altimétrica da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Valeriano & Albuquerque 2010) (Figura 10).

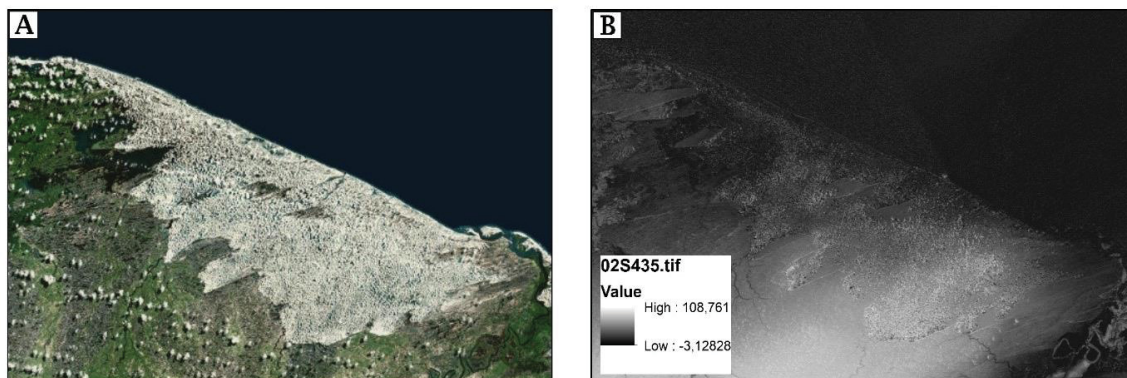


Figura 10 - Banco de dados utilizados como base cartográfica, referente ao campo de dunas Lençóis Maranhenses. A) imagem ótica de alta resolução. B) imagem do modelo digital de superfície (MDS) de 30 metros de resolução espacial.

5.1.2 Mapas de parâmetros morfoplanimétricos

Foram extraídas de modo manual no *software* ArcMap 10.1 as cristas das dunas que representam as dunas na sua forma e extensão (representadas por dado vetorial de linha), feitas a partir da identificação visual na imagem ótica (Figura 11).

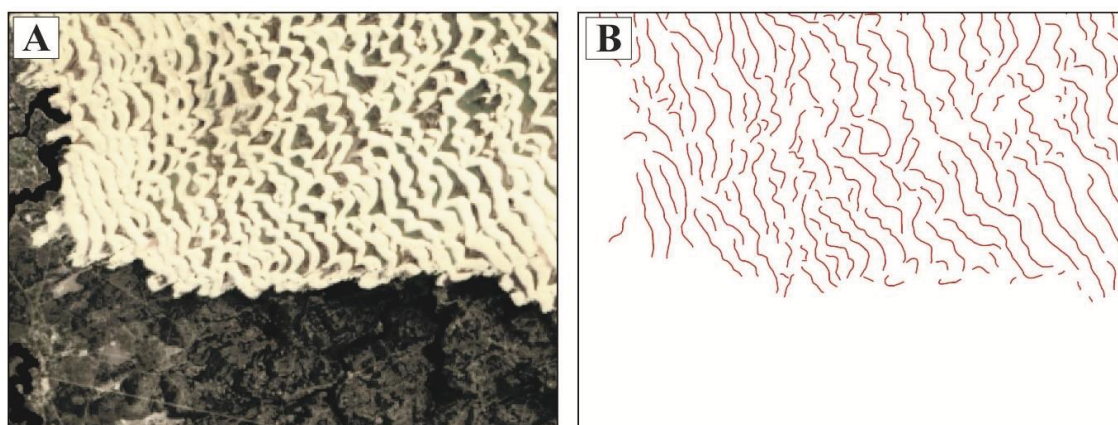


Figura 11 - Processo de extração manual das cristas das dunas. A) Identificação visual em imagem ótica de alta resolução. B) Representação das dunas por meio das cristas.

Essas cristas serviram como base para a geração dos mapas com os parâmetros morfoplanimétricos, tais como: espaçamento intercristas, comprimento de crista, orientação de crista, defeitos de crista (Ewing *et al.*, 2006) e índice de sinuosidade de duna.

Para calcular o valor do comprimento de cada crista foi usada a função “*calculate geometry*”. Posteriormente esses dados de linhas foram interpolados com o interpolador Ponderação do Inverso da Distância (IDW) (Watson & Philip 1985) (Figura 13), os quais foram discretizados em intervalos de comprimento de cristas delimitados por meio da distribuição dos dados amostrais visualizados por meio do histograma de cada campo de dunas. A orientação da crista foi medida ao longo de uma linha reta, paralela à tendência geral das linhas de cristas e para essa medida foi usada a ferramenta COGO. Tal ferramenta é comumente utilizada para extrair a orientação azimutal espacial de cada linha reta, inserida como dado de entrada. A partir desses valores, foi usado o interpolador IDW (Figura 13) para interpolar as cristas pertencentes aos mesmos intervalos de orientação. Todas essas etapas descritas foram realizadas com o *software* ArcMap 10.1.

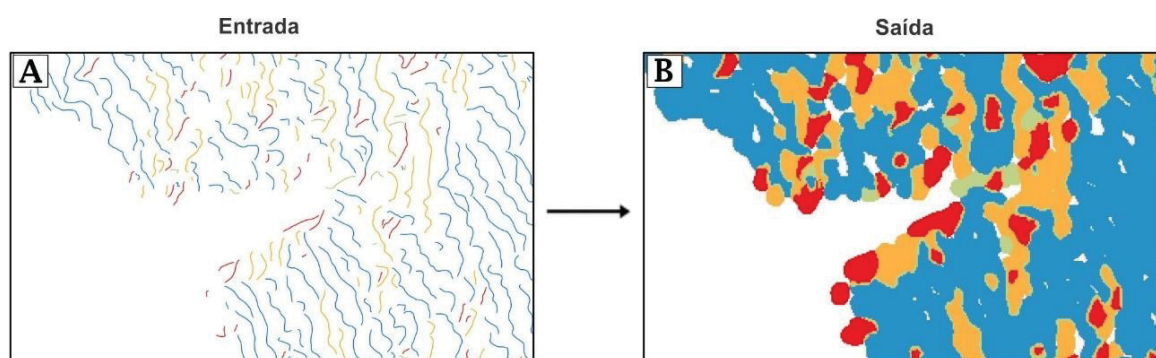


Figura 12 - Representação esquemática dos dados de entrada e saída utilizados e obtidos com o interpolador IDW. A) dados de linhas com discretização por cores diferentes as diferentes classes. B) dado interpolado com agrupamento das linhas com as mesmas classes.

Foi usada a função de estimador de densidade *kernel* para gerar os mapas de densidades de defeitos de crista e espaçamento intercristas, este último indica onde se encontram as cristas mais e menos espaçadas. Esse estimador de densidade usa

valores adimensionais para distinguir regiões com altas e baixas densidades de dados (Silverman 1986) (Figura 13).

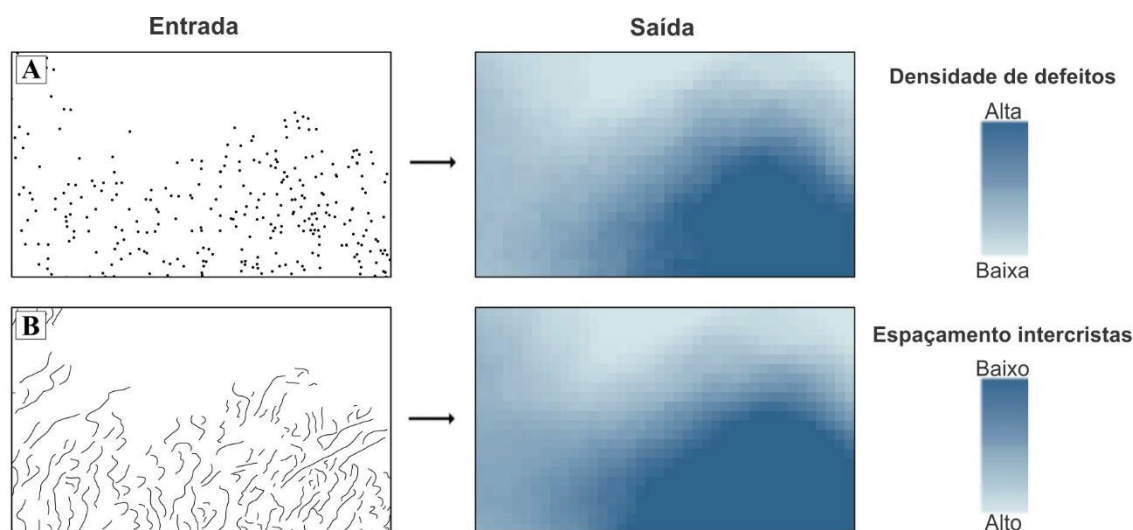


Figura 13 - Representação dos dados de entrada e saída do estimador de densidade *kernel*, que resulta (no dado de saída) nas regiões com baixas e altas concentrações de dados. A) dados de pontos utilizados para a obtenção dos mapas de densidade de defeitos de cristas. B) dados de linhas com representação das cristas utilizadas para a obtenção dos mapas do espaçamento intercristas.

Para o mapa altimétrico foi aplicada a hipsometria para o estudo comparativo da altimetria entre o campo de dunas e seu entorno, abrange a vegetação e drenagens. Por fim, foi calculado o índice de sinuosidade feito a partir da razão matemática entre o comprimento da linha reta (CLR) entre os defeitos das cristas sobre o comprimento da crista (CC) (Figura 14). A partir disso, foram determinadas classes com intervalos iguais para os campos de dunas. Essas classes foram definidas através das distribuições dos dados calculados, visualizadas por meio do histograma de cada campo. A primeira classe corresponde ao intervalo de 0 a 0,8, representa dunas com alta sinuosidade, com morfologia de braços alongados em forma de “U”. A segunda classe corresponde ao intervalo de 0,81 a 1, representa dunas com baixa sinuosidade de morfologia mais retilínea. Posteriormente, esses dados foram interpolados para discretizar essas duas classes com o interpolador IDW (Figura 12). Por fim, os parâmetros morfoplanimétricos foram correlacionados entre si

com o coeficiente de correlação *Pearson* (ρ), com o intuito de verificar quais parâmetros possuem relação direta ou inversa.

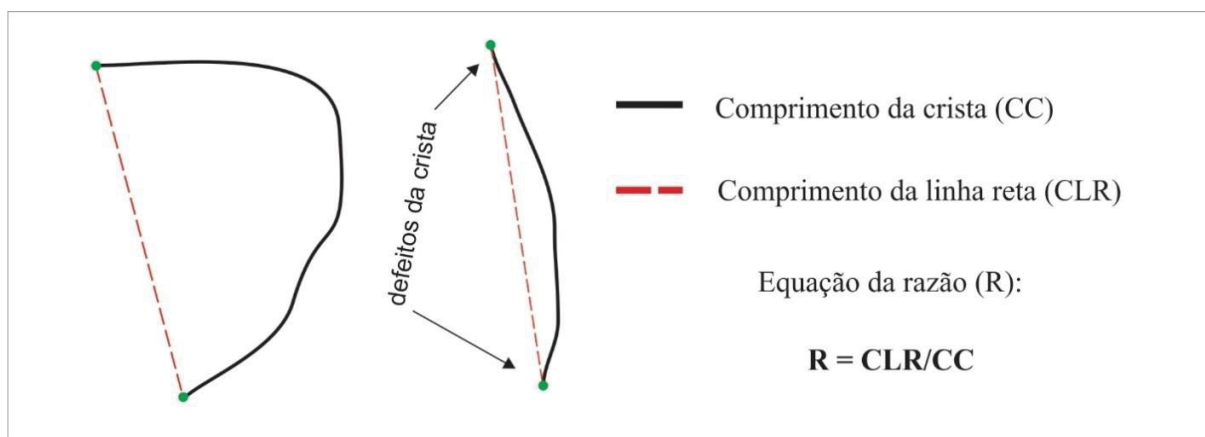


Figura 14 - Representação de duas diferentes morfologias de dunas e como o cálculo da razão é para a geração do mapa do índice de sinuosidade.

As rotinas das etapas apresentadas neste tópico são esquematizadas no fluxograma abaixo (Figura 15).

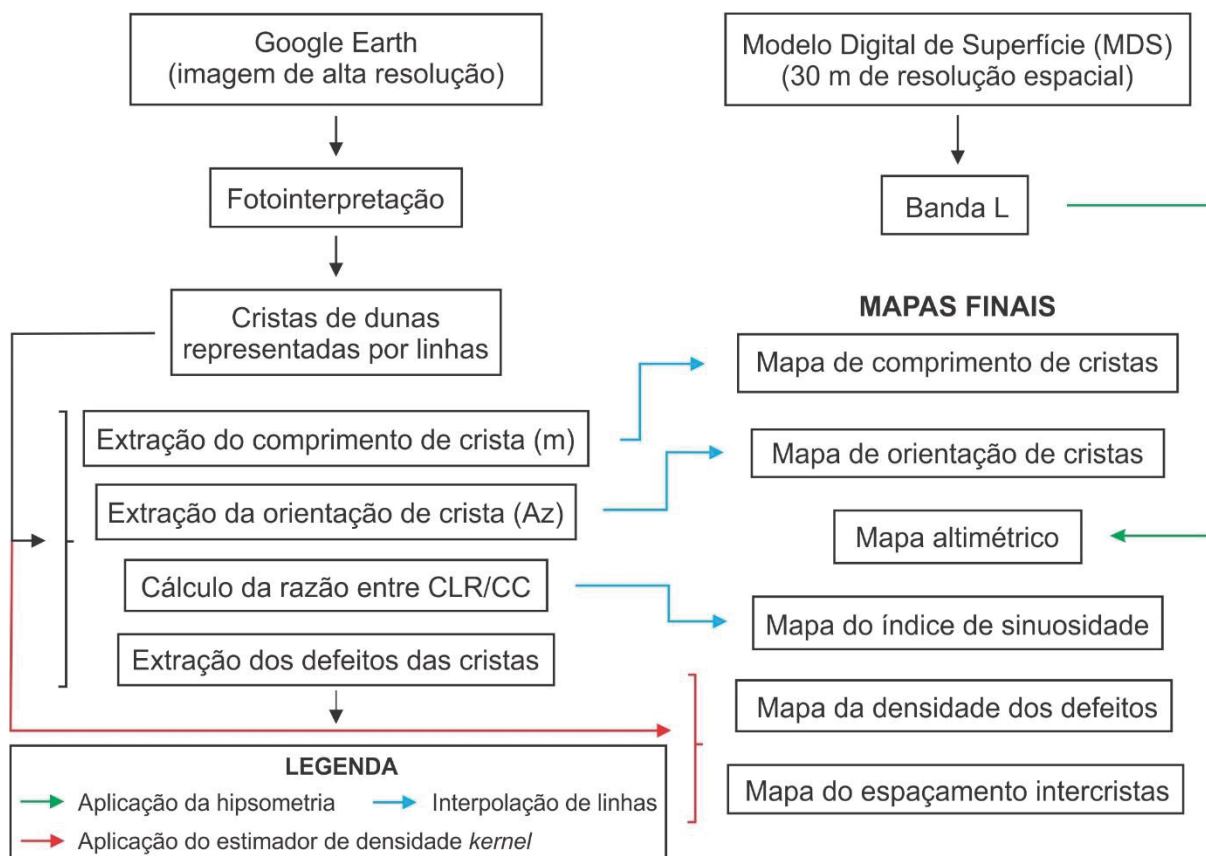


Figura 15 - Fluxograma com setorização das etapas desenvolvidas para extração e geração dos parâmetros morfoplanimétricos.

5.2 Treinamento do algoritmo de classificação semiautomatizada

5.2.1 Base de dados cartográficos

Para o treinamento do algoritmo de classificação semiautomatizada foram utilizadas as sete primeiras bandas do espectro ótico da órbita ponto 220-62, correspondente à área de estudo do Maranhão. Essas bandas óticas foram registradas pelo sensor OLI do LANDSAT 8 e adquiridas no sitio do *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), registradas no ano de 2016 (Figura 16).

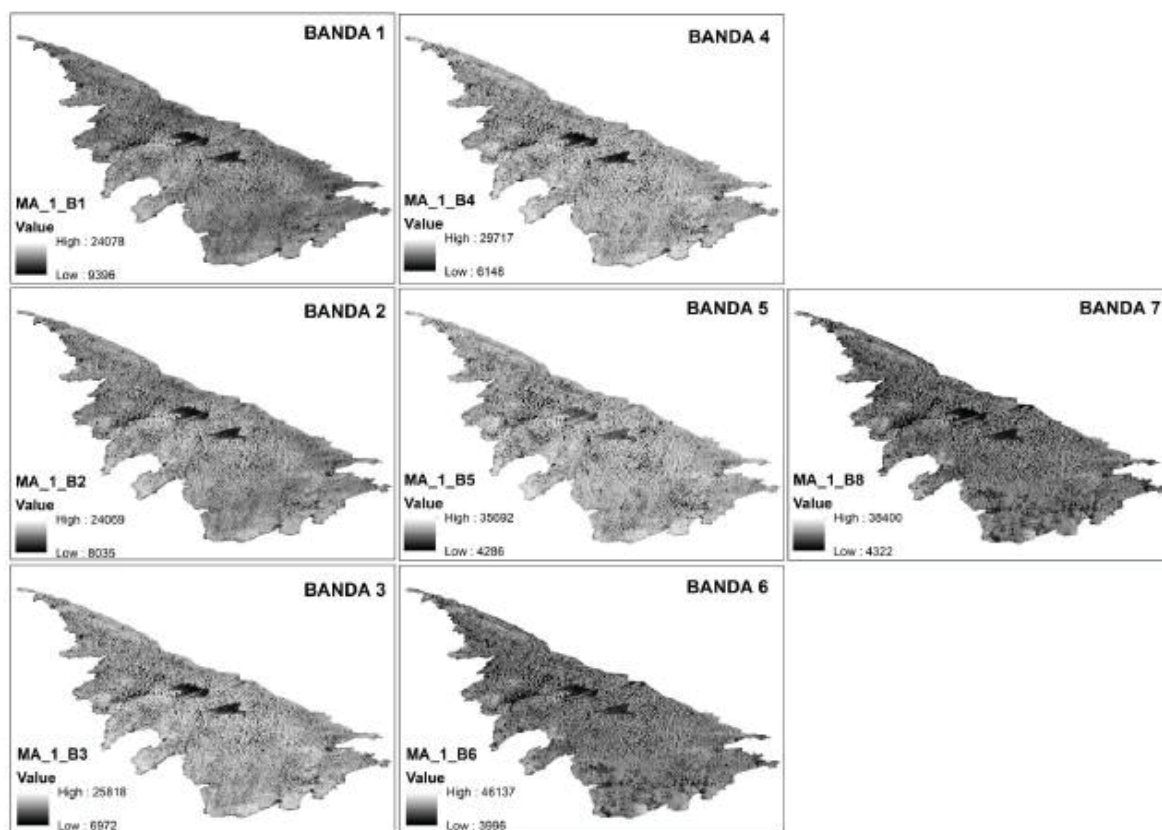


Figura 16 - Base cartográfica digital utilizada no treinamento do algoritmo com a resolução radiométrica de cada banda (situada inferior à esquerda).

5.2.2 Delimitação de duna e não-duna

Nesta etapa foram diferenciadas de maneira manual, as dunas dos demais componentes dentro do campo de dunas (como vegetação, água e feições deflacionares vegetadas), traçadas a partir de polígonos (no formato *shapefile*) delimitados em uma parte do campo de dunas, sob uma composição colorida RGB 654. A outra parte foi deixada sem informação (Figura 17).

Em seguida, estes dados foram convertidos para arquivo do tipo *raster* de resolução radiométrica de 1 *bit*, o qual foi atribuído o valor de 0 para as regiões correspondentes à não-duna, e o valor de 1 para as regiões correspondentes à duna. O *raster* foi nomeado “DUNAS” e utilizado como uma das variáveis de entrada para a classificação semiautomatizada.

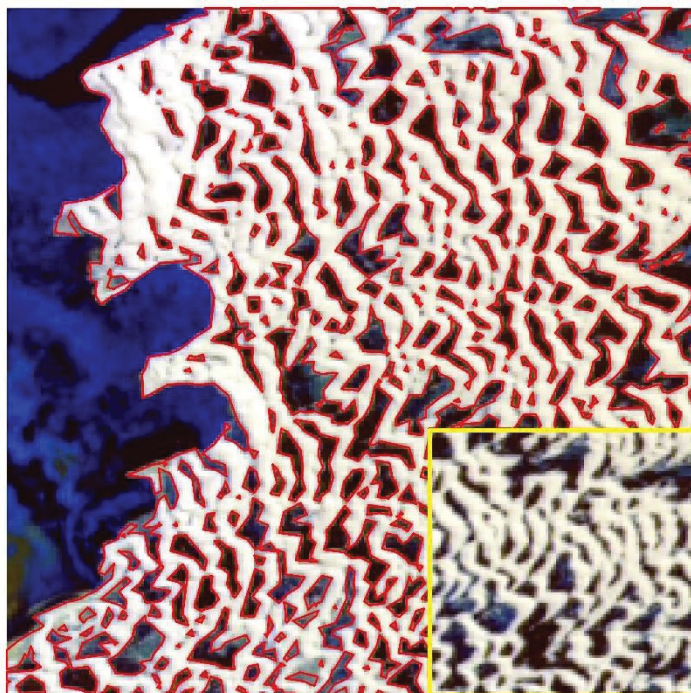


Figura 17 - Região sudeste do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses usada como região modelo para o banco de dados de entrada do treinamento. Em destaque (quadrado amarelo) a janela com dado vazio para a predição das dunas a partir do treinamento do algoritmo. Os polígonos vermelhos delimitam as regiões com dunas e o que está fora do polígono representam os outros componentes do campo de dunas.

5.2.3 Confecção do banco de dados para o treinamento do algoritmo

Nesta etapa, as variáveis das bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 da imagem ótica foram convertidas para vetor do tipo ponto (formato *shapefile*), e, posteriormente, extraída a assinatura espectral (*grid code*) de cada *pixel* das bandas. A partir disso, foi feita a sobreposição da variável DUNAS (Figura 13) com esses dados de *pixels*, aos quais foram discretizados os *pixels* que correspondem às regiões com dunas e os *pixels* que correspondem às regiões sem dunas. E, por fim, a partir dessas 8 variáveis de entrada foi construído o banco de dados (no formato *.xlsx*) para o treinamento e predição das regiões que foram deixadas vazias.

5.2.4 *Treinamento por Self-Organizing Maps*

Nesta fase foi utilizado o método não-supervisionado SOM para o treinamento do algoritmo, feito com o uso do *software* SiroSOM, disponível no laboratório LISTEC da USP/Santos. O treinamento SOM foi feito a partir dos dados de entradas (variáveis), descritos nos tópicos anteriores, com o tamanho de mapa definido em 24x26, e a forma geométrica utilizada na projeção foi o toróide.

5.2.5 *Análise exploratória dos dados treinados*

Por fim, os dados treinados pelos SOM foram submetidos às análises estatísticas por meio de uma matriz de correlação, matriz *u* e *components plot*, tendo em vista a identificação de variáveis pouco correlacionadas ou muito correlacionadas, nessa última, representam redundância para o algoritmo treinado. Essas variáveis de alta correlação influenciam negativamente nos resultados e, por esse motivo, devem ser excluídas do algoritmo.

Todas as etapas desse tópico são sintetizadas no fluxograma abaixo (Figura 18).

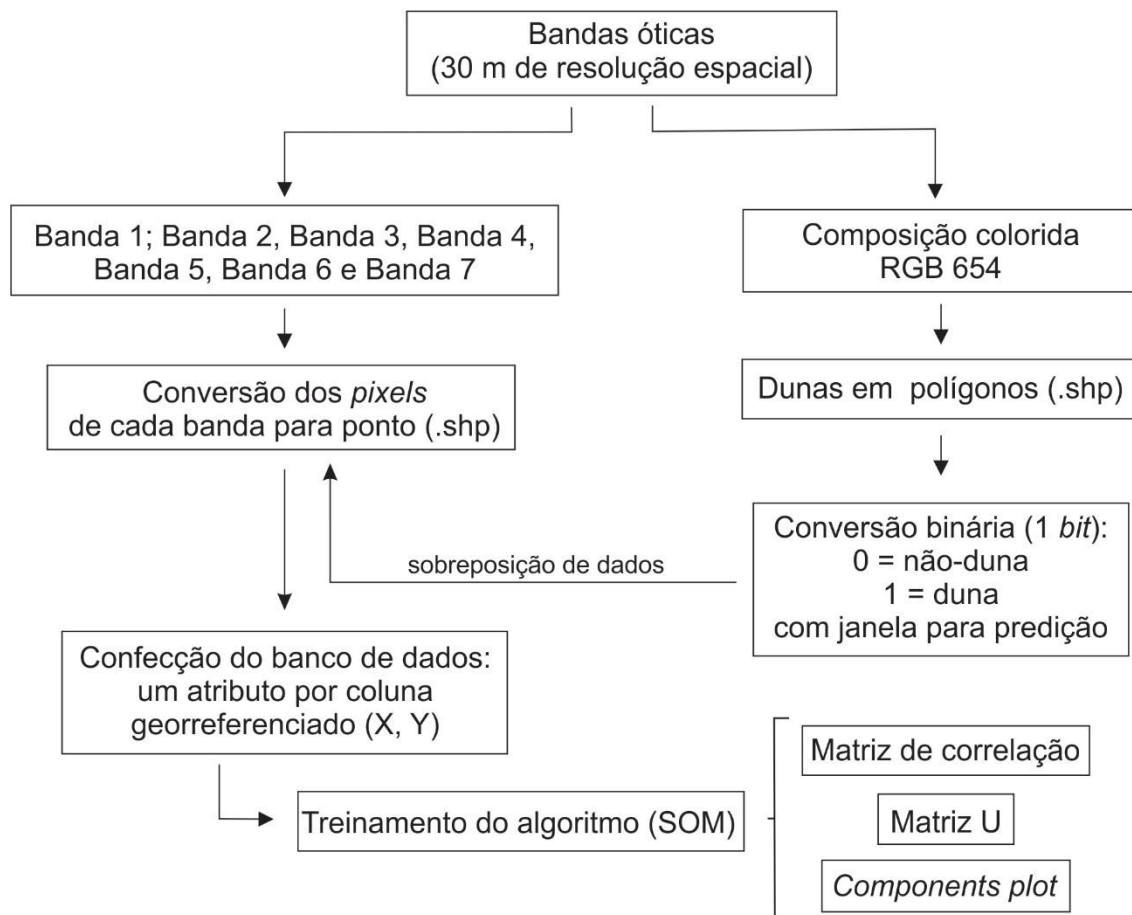


Figura 18 - Fluxograma com as etapas desenvolvidas no treinamento do algoritmo de classificação semiautomatizada das cristas de dunas.

6.1 RESULTADOS DO ARTIGO

Análise e interpretação de sistemas eólicos costeiros complexos na região dos Lençóis Maranhenses

Dourado, F.F¹; Guedes, C.C.F¹

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná (PPGeol), Curitiba, Paraná, Brazil

Resumo

As disposições espaciais das dunas no sistema eólico representam determinado estágio de evolução ou maturidade do sistema no tempo e são resultantes das condições limites impostas aos sistemas eólicos costeiros. Esse artigo objetiva compreender a evolução dos principais campos de dunas costeiros do Maranhão e sua relação com as condições limites impostas a esses campos, tendo como base a análise quantitativa dos parâmetros morfoplanimétricos. Para tal, foram extraídas, de modo manual, a partir da identificação visual em imagens de sensores remotos, as cristas das dunas utilizadas para a confecção dos parâmetros morfoplanimétricos. Dentre os parâmetros analisados, o espaçamento intercristas e densidade de defeitos de crista são os que apresentaram os melhores resultados, com correlação negativa para os três maiores campos de dunas de estudos e correlação positiva para o campo de Ilha do Caju. Tais resultados foram interpretados como indicativos de uma evolução diferenciada nos campos que permitem separar dois cenários: i) regiões mais evoluídas, de dunas muito interagentes entre si e; ii) regiões menos evoluídas, com dunas pouco interagentes. O campo de dunas Ilha do Caju apresenta uma maior evolução uniforme em todo o campo e uma maior maturidade se comparada aos campos de maiores áreas. Essa evolução e maturidade são mais rápidas em campos menores.

Palavras-chave: parâmetros morfoplanimétricos; estudos quantitativos; evolução costeira.

1. INTRODUÇÃO

Os campos de dunas são depósitos eólicos que estão dispostos em todas as regiões do mundo, em ambientes com aporte sedimentar e vento efetivo (Martínez *et al.*, 2004). Esses depósitos são formados a partir do acúmulo de sedimentos arenosos com feições de morro ou cadeia e apresentam estrutura de barlavento suave e sotavento íngreme (McKee 1979; Carter 1988). Estima-se que os campos de dunas cubram uma área total de aproximadamente 5.000.000 km², ao qual cerca de 99% desses campos são do tipo desérticos e, apenas 1%, do tipo costeiro (Martínez *et al.*, 2004, Tsoar 2004).

O estudo e interpretação dos diversos tipos desses depósitos conhecidos no mundo são vistos como sistemas de alta complexidade de entendimento evolutivo (Kocurek & Ewing 2005). Em termos gerais e de auto-organização, os campos de dunas são divididos em padrões “simples” e “complexos”. Os simples apresentam padrões de auto-organização de fácil interpretação evolutiva, cujos padrões são resultantes de ambientes sem alterações nas condições limites ao longo do tempo. Os complexos ocorrem com mais frequência e são formados a partir de vários padrões simples sobrepostos entre si, associados a resultados de variações nas condições limites que refletem na mudança no aporte sedimentar e no regime de vento (Kocurek & Ewing 2005).

As distribuições espaciais e as variações na tipologia das feições eólicas nos campos de dunas são os exemplos mais “eloquentes” de padrões na natureza (Kocurek & Ewing 2005, Ewing *et al.*, 2006, Wilkins & Ford 2007). Para a compreensão desses padrões, faz-se necessário a utilização de modelos computacionais de interpretação que permitam analisar a influência das condições limites do sistema (Werner 1995, Bishop *et al.*, 2002, Ewing & Kocurek 2010), tais como: regime de vento, aporte sedimentar, geometria da área fonte, limites geométricos do sistema eólico e condições antecedentes (Ewing & Kocurek 2010). A geometria da área fonte é dividida em três fontes: lineares, planas e pontuais (Ewing & Kocurek 2010). As condições antecedentes representam variáveis que podem influenciar na delimitação dos limites geométricos do campo de dunas, como vegetação, nível freático próximo à superfície e topografia da região (Ewing & Kocurek 2010).

Seguindo o desafio da interpretação e entendimento dessa temática, Ewing *et al.* (2006) definiram um método de análise do sistema eólico a partir de quatro parâmetros, conhecidos como parâmetros morfoplanimétricos, são eles: espaçamento intercristas ou interdunas, comprimento de crista, orientação de crista e defeitos de crista. Tal método visa uma abordagem quantitativa dos padrões de dunas para interpretação das condições limites dos campos dunares.

Os padrões espaciais de distribuição de dunas são entendidos como a representação de determinado estágio de evolução ou maturidade do sistema eólico no tempo (Ewing *et al.*, 2006). Para Ewing *et al.* (2006) e Kocurek *et al.* (2010) são conhecidos dois cenários de evolução e maturidade nos campos de dunas. O primeiro cenário é pautado na alta evolução do campo, com interações construtivas entre os defeitos de dunas. Essas interações são fusões entre dunas e são ocasionadas pela dinâmica de migração que refletem no aumento do espaçamento intercristas e no comprimento, proporcionam a diminuição da densidade de defeitos e na precisão da orientação uniforme das cristas em função do tempo. O segundo cenário representa um campo menos evoluído, de dunas menos interagentes entre si com baixo espaçamento intercristas, alta densidade de defeitos e dunas com menores comprimentos que tendem ficar mais aglomeradas e truncadas no campo de dunas (Werner & Kocurek 1999; Kocurek & Ewing 2005, Ewing *et al.*, 2006, Derickson *et al.*, 2008, Kocurek *et al.*, 2010). Segundo os mesmos autores, as análises estatísticas básicas dos parâmetros dos campos de dunas são consistentes com o modelo de auto-organização, aos quais estes parâmetros são variáveis dos padrões evolutivos dos campos dunares através do tempo.

Estudos sobre sistemas eólicos costeiros de caráter quantitativos, feitos a partir dos parâmetros morfoplanimétricos, têm sido frequentemente realizados ao longo dos campos de dunas do mundo, com aumento considerável desde as últimas décadas até atualidade (Werner 1995, Nishmori *et al.*, 1998; Beveridge *et al.*, 2006; Ewing & Kocurek 2010, Eastwood *et al.*, 2011).

Os estudos mais comuns nos campos de dunas da costa brasileira visam abordagens com caráter mais qualitativos, do tipo: geomorfológicos (Martinho *et al.*, 2008, Tomazelli *et al.*, 2008), morfodinâmicos (Giannini *et al.*, 2011, Hilbert *et al.*, 2015), sedimentológicos (Hilbert *et al.*, 2015), geocronológicos (Tsoar 2005, Giannini *et al.*, 2007, Guedes *et al.*, 2013, Mendes *et al.*, 2015, Guedes *et al.*, 2017) e outros

que envolvem escalas mais regionais, como por exemplo o estudo dos sistemas deposicionais eólicos do Quaternário costeiros no Brasil por Giannini (2007). Já os estudos baseados em abordagens quantitativas são incipientes no Brasil (Hilbert *et al.*, 2015).

A costa maranhense, nordeste do Brasil, abriga campos de dunas de diferentes tamanhos com os dois dos maiores campos de dunas do Brasil: Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis Maranhenses e outros menores como o de Tutóia e da Ilha do Caju. Por estarem regionalmente próximos, muitas das variações das condições limites, como clima/paleoclima e posicionamento da linha de costa, afetaram a evolução dos campos de dunas dessa região de forma homogênea. Entretanto, esses campos de dunas possuem características distintas (Hilbert *et al.*, 2015), que sugere que os fatores locais tenham fortes influências nos padrões de dunas e tornam a região um bom campo de estudo para a análise da influência dos fatores locais nos padrões de distribuição das feições eólicas. Assim, o objetivo do presente trabalho é, com base na análise quantitativa dos parâmetros morfoplanimétricos, entender a evolução dos quatro principais campos de dunas costeiros do Maranhão e sua relação com as condições limites regionais e locais impostas a esses campos.

2 CONTEXTO REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

Os quatro campos de dunas estudados encontram-se no estado do Maranhão e estão dispostos entre a baía de São José (a leste) e a foz do rio Paranaíba (a oeste) (Figura A1a). Na área de estudo há uma diminuição progressiva dos campos de oeste para leste, com uma assimetria marcada pela frente de avanço acentuada rumo ao interior mais no leste do que no oeste (Giannini 2007).

O clima é influenciado pelo posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), feição atmosférica que controla a distribuição espacial e temporal da chuva e do vento na região (Melo *et al.*, 2009). O clima da região é sub-úmido com temperatura média anual de 26,5 °C (Nimer 1989, IBGE 1992). Hilbert *et al.* (2015), em uma análise do regime de ventos a partir de dados *reanalysis* numa série de 1948 a 2014, obtidos de NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996), apontam que ventos de E e NE são mais frequentes na região.

Ao longo do ano, as maiores taxas de precipitação ocorrem nos seis primeiros meses do ano (Jimenez *et al.*, 1999, Luna *et al.*, 2012), com uma média de 1480 mm (Tsoar *et al.*, 2009), a qual essa alta precipitação compreende ao período em que a ZCIT atua sobre a costa maranhense. Nesse período também ocorre uma diminuição dos ventos provenientes de E e NE (Tsoar *et al.*, 2009), que proporciona condições desfavoráveis ao transporte eólico (Guedes *et al.*, 2017). Já nos últimos seis meses do ano a precipitação média fica em torno de 140 mm (Tsoar *et al.*, 2009), relacionada à ZCIT distante da área de estudo, na região norte do país, assim, favorece o transporte eólico pelos ventos efetivos (Tsoar *et al.*, 2009, Guedes *et al.*, 2017).

O campo de dunas dos Lençóis Maranhenses (LM) (Figura A1b) está localizado no norte do estado do Maranhão, no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses entre a baía estuarina de São José e a foz do rio Parnaíba. Cobre uma área total de aproximadamente 1.000 km² de dunas transgressivas, com feições morfológicas predominantes de cadeias barcanóides, barcanas e dunas parabólicas (Sawakuchi 2006, Hesp *et al.*, 2009, Luna *et al.*, 2012, Hilbert *et al.*, 2015). Na maior parte do campo são encontradas dunas livres e lagoas interdunares de água doce, as quais são inundadas durante os períodos de chuva, tanto nas regiões mais próximas à costa quanto mais ao interior (Gonçalves *et al.*, 2003, Parteli *et al.*, 2006, Sawakuchi 2006, Levin *et al.*, 2008, Hesp *et al.*, 2009, Luna *et al.*, 2012). Nas bordas são encontradas vegetações em meio às dunas do tipo restinga, mangue, cerrado e campo cerrado (MMA/IBAMA 2003).

O campo de dunas Pequenos Lençóis Maranhenses (PLM) (Figura A1c), com uma área de aproximadamente 150 km², fica a leste dos Lençóis Maranhenses e a oeste do campo de dunas Tutóia e é o segundo maior campo de dunas do nordeste brasileiro. Apresenta assimetria muito pronunciada, com a frente sudeste que avança 12 km ao longo da direção do vento, enquanto o lado ocidental atinge menos da metade dessa distância. O campo é delimitado a oeste pelo rio Preguiças que bloqueia o avanço das dunas transgressivas na região mais ocidental e resulta na formação de cadeias barcanóides, separadas das dunas barcanas por uma planície composta por *nebkhas*, protodunas e depósitos deflacionares residuais compostos por areia grossa e grânulos (Hilbert *et al.*, 2015).

O campo de Tutóia (TT) (Figura A1d) é o terceiro maior do nordeste. É delimitado ao norte pela praia do Arpoador, ao sul pelo rio Cangatá e áreas de

manguezais. Possui uma área de aproximadamente 40 km² de dunas transgressivas que avançam até 4,5 km para o interior do continente, com áreas deflacionares que chegam a ocupar até 22% do campo. Essas áreas deflacionares são compostas por retrocordões e rastros lineares residuais e dividem o campo em dois “subcampos” menores: i) um campo isolado mais a noroeste, em contato com a praia e vegetação de alto porte, a sudoeste e; ii) o outro mais distal da praia, a sul, também em contato com a vegetação, corresponde à frente de avanço do campo com dunas do tipo barcanas e cadeias barcanóides (Hilbert *et al.*, 2015).

O campo de dunas Ilha do Caju (IC) (Figura A1e) apresenta uma área de aproximadamente 30 km², está localizado a leste dos demais campos de dunas e é o de menor área entre os quatro campos principais. É delimitado a leste pela baía do Caju e a oeste e a sul pela baía da Melancieira. As principais ocorrências de dunas são as do tipo barcanas isoladas e barcanóides, com migração para W-SW, e na região norte-nordeste do campo há ocorrências de cadeias de barcanóides. Já na região sudeste as dunas barcanas são limitadas na linha de costa por uma área deflacionar com a presença de retrocordões (Hilbert *et al.*, 2015).

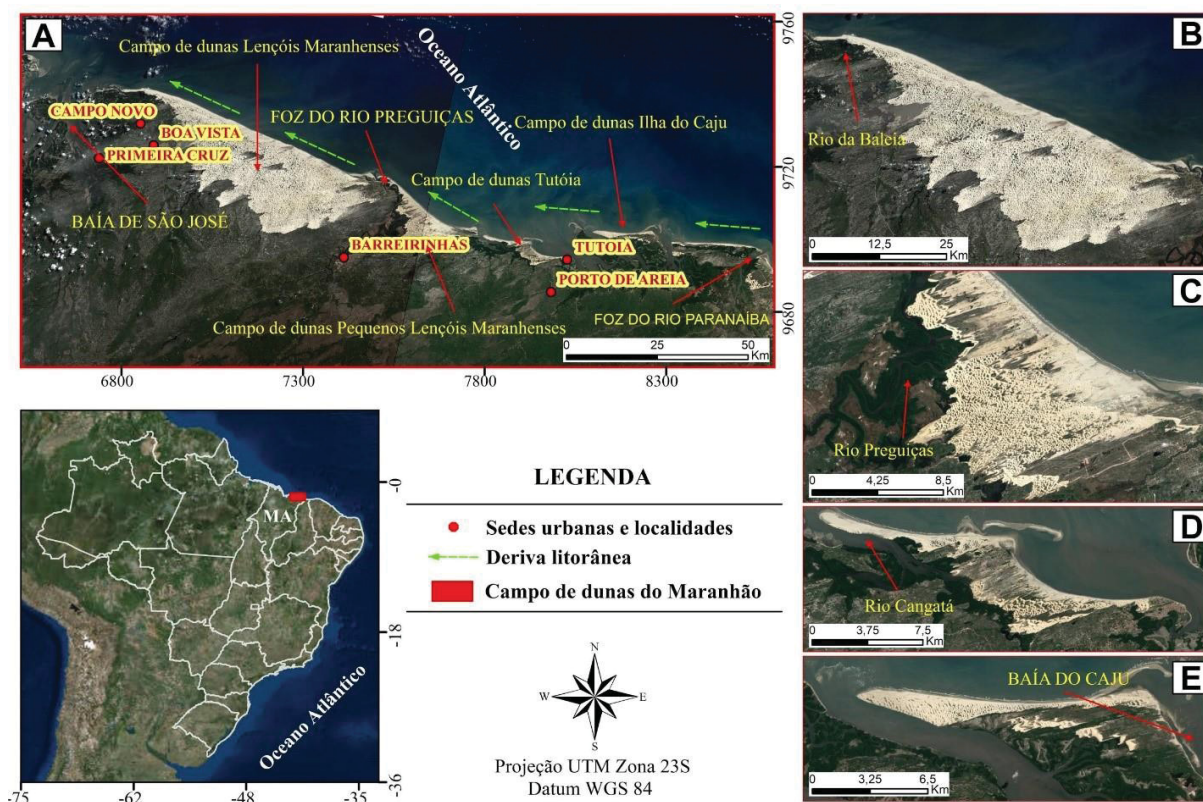


Figura A1 - A) Mapa de localização dos campos de dunas do Maranhão com as toponímias locais. B) Campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. C) Campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. D) Campo de dunas de Tutóia. E) Campo de dunas Ilha do Caju.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Base cartográfica de sensores remotos

A imagem ótica utilizada neste estudo possui resolução espacial de 0,5 metro e registra o cenário costeiro do dia 10 de setembro de 2016, pertence ao banco de dados da DigitalGlobe e foi registrada pelo satélite *GeoEye*. Essa imagem foi acessada abertamente na plataforma *online* do Google Earth®. Em conjunto com esses dados, também foram adquiridas imagens do espectro micro-ondas (Banda-L) de resolução espacial de 30 metros que contêm o modelo digital de superfície (MDS), obtidas no banco de dados TOPODATA (<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>), da cena 02S435, referente à área de estudo. As imagens TOPODATA são modelos digitais com representação de superfície, resultado de produtos de interpolação, aprimoramento e correções das imagens altimétrica da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Valeriano & Albuquerque 2010).

3.2 Mapas de parâmetros morfoplanimétricos

Foram extraídas, de modo manual, as cristas das dunas que representam as dunas na sua forma e extensão (representadas por dado vetorial de linha), feitas a partir da identificação visual na imagem ótica. Tais cristas serviram como base para a geração dos mapas com os parâmetros morfoplanimétricos, tais como: espaçamento intercristas, comprimento de crista, orientação de crista, defeitos de crista (Ewing *et al.*, 2006) e índice de sinuosidade de duna, descritos a seguir.

O espaçamento intercristas é a distância entre duas cristas de dunas, medido na direção da migração da duna. O comprimento de crista é a distância ao longo da

crista, entre as extremidades dos defeitos ou terminações de dunas. A orientação de crista é a disposição geográfica da duna no espaço; os defeitos de crista são as terminações das extremidades das dunas (Ewing *et al.*, 2006). E, o índice de sinuosidade da duna é a razão entre o comprimento da linha reta entre as duas extremidades da duna sobre o comprimento dela.

Em todas as etapas cartográficas foram usados o *software* ArcMap 10.1. As rotinas apresentadas neste tópico são esquematizadas no fluxograma (Figura A2). O cálculo do comprimento de cada crista foi realizado através da função “*calculate geometry*”. Posteriormente, os dados de linhas foram interpolados com o interpolador Ponderação do Inverso da Distância (sigla em inglês IDW) (Watson & Philip 1985), e discretizados em diferentes intervalos de comprimentos de cristas para cada campo de dunas. Os resultados foram separados em intervalos delimitados por meio da distribuição dos dados amostrais, visualizados por meio do histograma de cada campo. A orientação da crista foi medida ao longo de uma linha reta, paralela à tendência geral das cristas e para essa medida foi usada a ferramenta COGO. Tal ferramenta é comumente utilizada para extrair a orientação azimutal espacial de linhas retas inseridas como dado de entrada. A partir desses valores, foi usado o IDW para interpolar as cristas pertencentes aos mesmos intervalos de orientação.

A partir da função de estimador de densidade *kernel* foram gerados mapas de densidades de defeitos de crista e espaçamento intercristas. Esses mapas indicam onde há menores e maiores densidades de defeitos de cristas e menores e maiores espaçamentos intercristas. Esse estimador de densidade usa valores adimensionais para distinguir regiões com menores e maiores densidades de dados (Silverman 1986). Para o mapa altimétrico foi aplicada a hipsometria para o estudo comparativo da altimetria entre o campo de dunas e seu entorno, que abrange vegetação e drenagens. O índice de sinuosidade foi calculado a partir da razão matemática entre o comprimento da linha reta (CLR) entre as extremidades das cristas sobre o comprimento da crista (CC). A partir disso, foram determinadas classes com intervalos iguais para os campos de dunas que foram definidas através das distribuições dos dados calculados e são visualizadas por meio do histograma de cada campo. A primeira classe corresponde ao intervalo de 0 a 0,8 e representa dunas de alta sinuosidade com morfologias de braços alongados em forma de “U”. A segunda classe corresponde ao intervalo de 0,81 a 1 e representa dunas de baixa sinuosidade, com

morfologias mais retilíneas. Posteriormente, esses dados foram interpolados para discretizar duas classes com o interpolador IDW. Por fim, os parâmetros morfoplanimétricos foram correlacionados entre si a partir do coeficiente de correlação *Pearson* (ρ), com o intuito de verificar quais parâmetros possuem relação direta ou inversa.

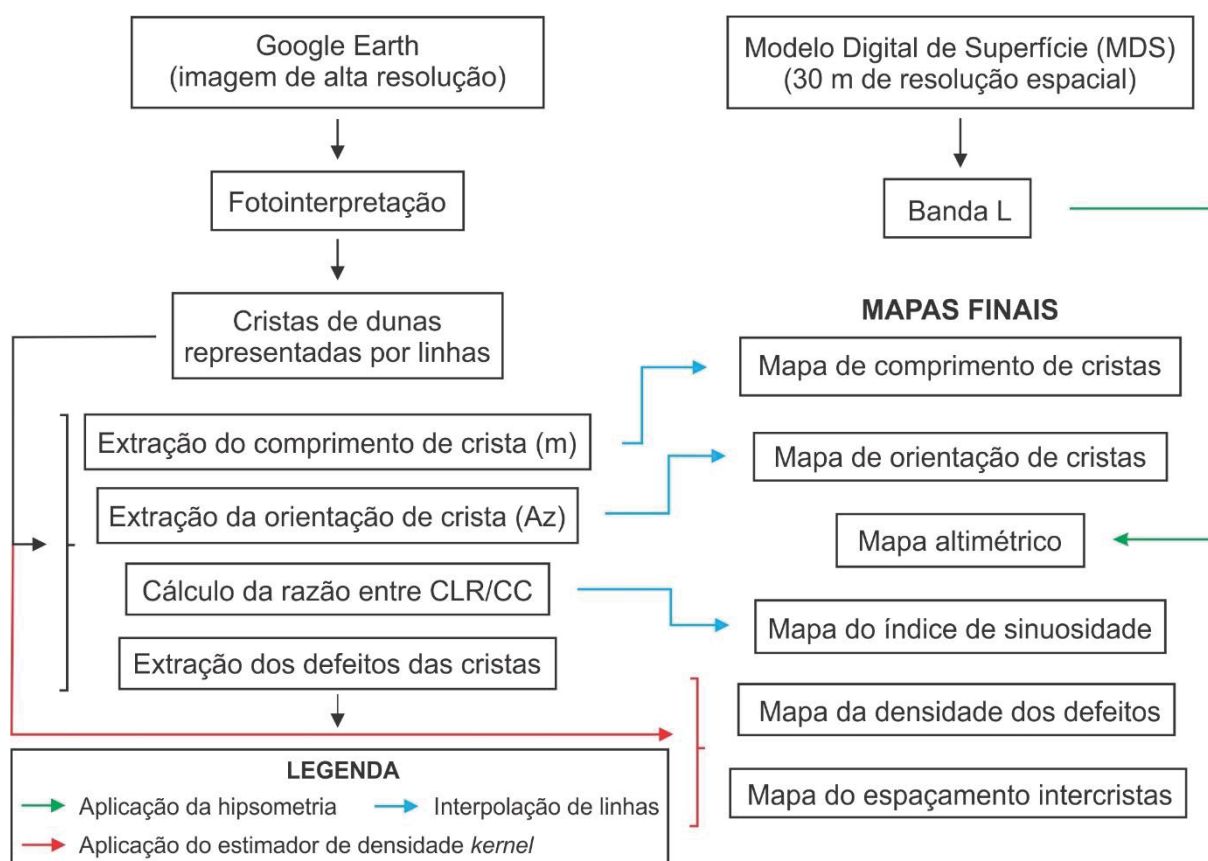


Figura A2 - Fluxograma com as etapas desenvolvidas no projeto.

4 RESULTADOS

4.1 Altimetria

O campo de dunas dos LM apresenta variação altimétrica gradativa ao longo do campo com as maiores cotas altimétricas, de até 70 m, localizadas nas regiões sul

e sudeste, adjacente à foz do rio Preguiças. As áreas de menores altitudes são as mais próximas à praia, a norte e noroeste, com 2 m (Figura A3a).

Já os PLM não apresentam uma variação altimétrica gradativa (Figura A3b). As cotas altimétricas têm poucas variações dentro do campo, com valores entre 2 e 10 m. Em alguns pontos isolados em contato com a vegetação densa de alto porte e drenagens, como nas regiões noroeste, leste, sul e sudoeste são observados valores altimétricos elevados com até 27 m.

O campo de dunas de TT apresenta duas pequenas regiões com valores altimétricos entre 12 a 17 m. A primeira região está situada no noroeste, adjacente ao contato entre a vegetação de alto porte e à foz do rio Cangatá. A segunda está nas extremidades sul e sudeste, em contato com a vegetação de baixo porte presente na borda limite do campo (Figura A3c). Nas demais regiões do campo de dunas (leste, norte, central e oeste) a altitude possui baixos valores e varia de 2 a 6 m, com regiões planas nas suas maiores áreas.

O campo de dunas IC possui uma suave variação altimétrica e são identificadas as maiores cotas em pontos isolados na região oeste, e as mais elevadas no sudeste (ambas as regiões situadas adjacentes à baía do Caju). Na região oeste as cotas altimétricas alcançam 10 m, já na região isolada sudeste alcançam 25 m. As demais regiões do campo (centrais e leste) são relativamente planas, com altitude que varia de 2 a 4 m (Figura A3d).

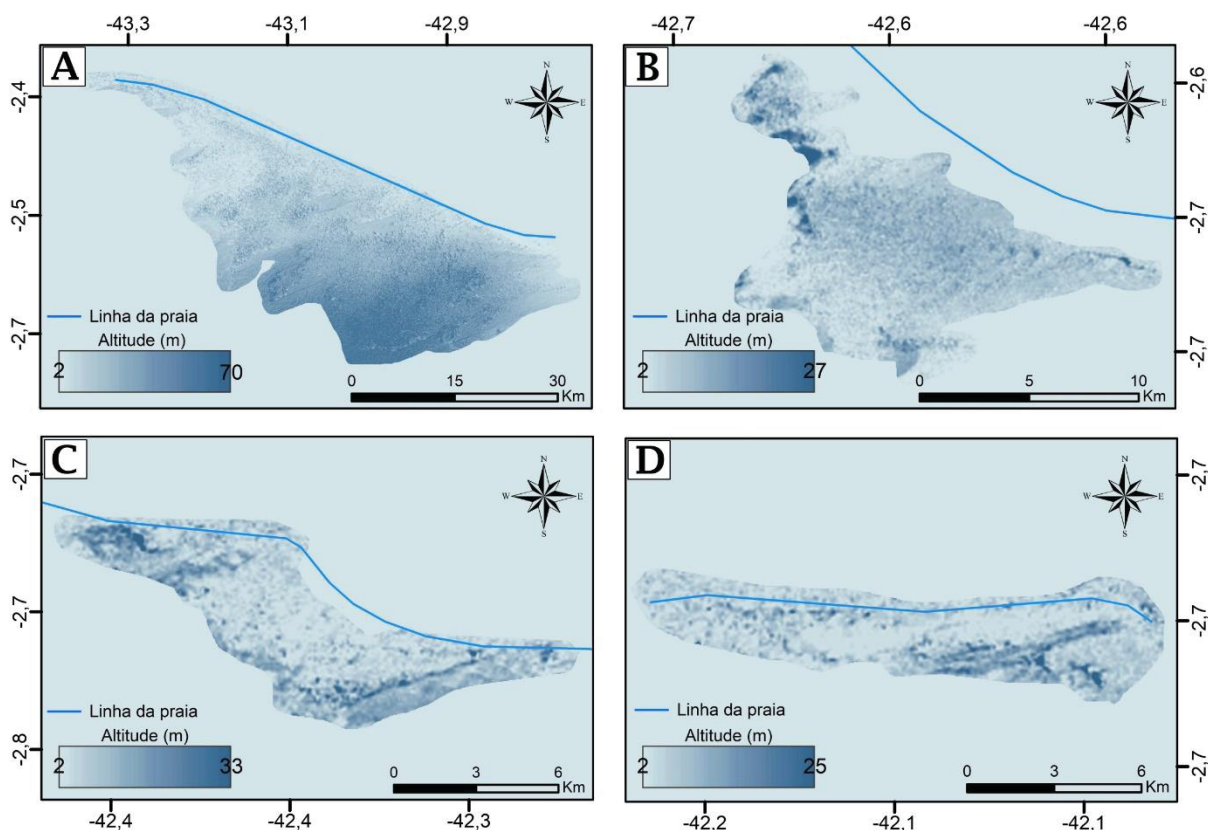


Figura A3 - Mapas altimétricos dos campos de dunas e seus entornos. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.

4.2 Espaçamento intercristas

O campo de dunas LM apresenta uma distribuição heterogênea do espaçamento intercristas. Os menores espaçamentos (ou dunas pouco espaçadas) ocorrem nas regiões sul e sudeste, nas frentes de avanço do campo sobre dunas estabilizadas pela vegetação que varia de baixo a alto porte e, algumas pequenas drenagens na região leste, adjacente à foz do rio Preguiças. Ambas ocorrências estão sempre em contato com as bordas do campo. Já nas demais regiões: nordeste, norte, noroeste e centro (que compreende uma maior da área do campo), ocorrem os maiores espaçamentos (ou dunas mais espaçadas) (Figura A4a).

No campo de dunas PLM a distribuição do espaçamento de dunas é heterogênea. Nas regiões leste, centro, oeste e sul são encontradas dunas de

menores espaçamentos. Já nas demais regiões, ocorrem maiores espaçamentos interdunas (Figura A4b).

O campo de dunas TT apresenta uma distribuição homogênea de espaçamento de dunas. A região isolada no noroeste do campo compreende aos menores espaçamentos, já nas regiões sul e sudeste se encontram os maiores (Figura A4c).

Mais semelhante ao campo de TT, o campo de dunas IC apresenta dunas mais homogeneamente espaçadas por todo o campo (Figura A4d).

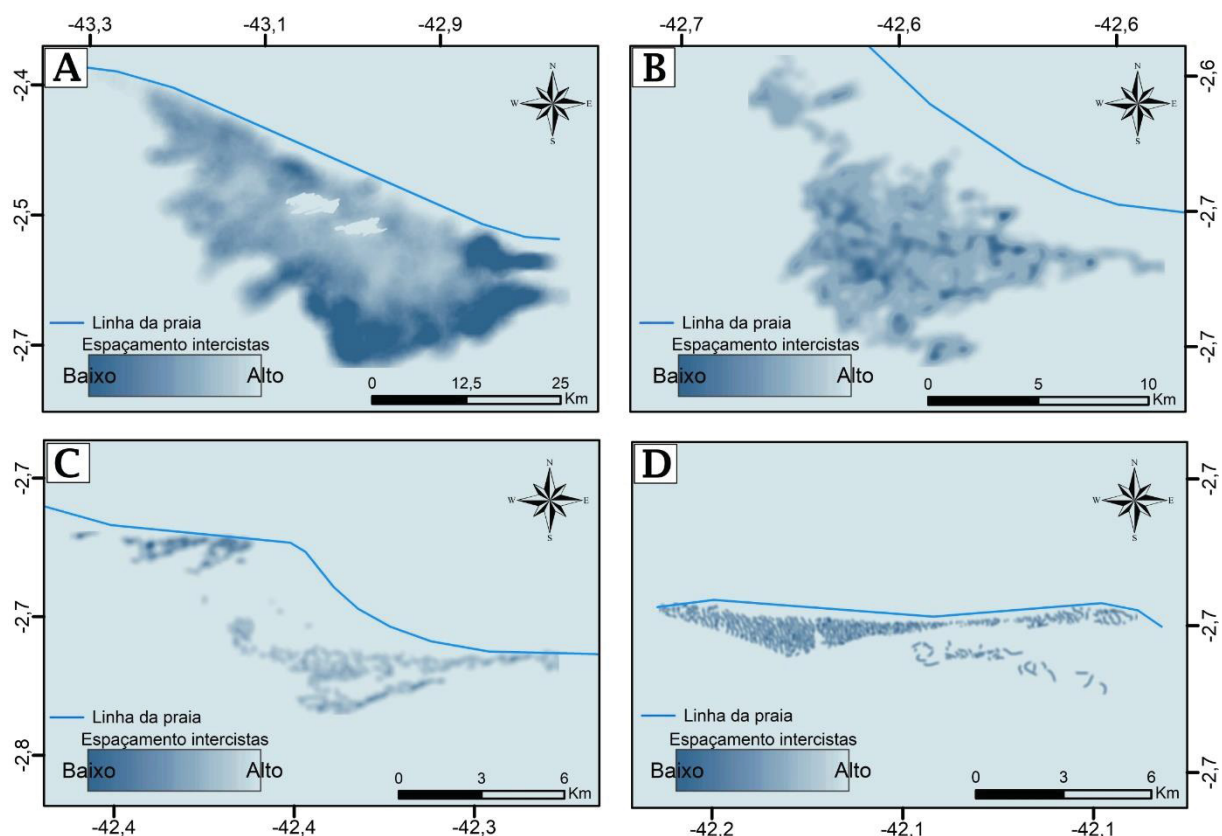


Figura A4 - Mapas com menores e maiores espaçamentos intercristas dos campos de dunas. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.

4.3 Orientação de cristas

No campo de dunas dos LM as cristas estão orientadas na sua maior proporção para noroeste (NW) e representam 38% da frequência de ocorrência. Essa orientação

de crista ocorre por todo o campo, com maior proporção nas regiões sudeste e sul, coincidentes com as principais frentes de avanços do campo de dunas, em contato com a vegetação e pequenas drenagens que limitam o campo de dunas. As cristas com orientação para norte (N) representam 31% e ocorrem em todas as regiões do campo de dunas, com menor densidade em torno das bacias deflacionares e na extremidade sudoeste na frente de avanço do campo. As cristas orientadas para nordeste (NE) representam cerca de 26% do campo de dunas, também estão distribuídas por todo o campo, porém, com predomínio nas regiões centrais, norte e nordeste, em contato com a praia e em torno das bacias deflacionares. E, por fim, com representação menor que 5%, as cristas de orientação leste-oeste (E-W) estão em todas as regiões do campo de dunas, com maior concentração nas bordas do campo e em volta de pequenas bacias deflacionares (Figura A5a).

A maioria das cristas no campo de dunas dos PLM está orientada para NW, com uma representação de 37%. Estão distribuídas heterogeneamente por todas as regiões do campo, com menor ocorrência na região norte, próximo à praia. As cristas de orientação para NE compreendem 30%, estão mais concentradas nas regiões norte e noroeste do campo (adjacente à praia) e ocorrem nas demais regiões em menor proporção. As cristas de orientação para N, com 28%, ocorrem em maior frequência nas regiões centrais e norte do campo de dunas e mais esporadicamente nas regiões leste e sul. Por último, com menor representatividade, as cristas de orientação E-W compreendem menos de 6%, e estão situadas principalmente nas bordas do campo de dunas e, mais raramente, no centro do campo (Figura A5b).

No campo de dunas TT, as cristas com orientação para NW representam aproximadamente 60% de todo o campo. Estão distribuídas por todas as regiões, com menor frequência nas regiões centrais. As cristas com orientação para N representam 21% do total e ocorrem em todas as regiões do campo de dunas, com predomínio de ocorrência nas regiões centrais e norte, próximo à praia. Com ocorrência em todas as regiões do campo e maiores concentrações nas centrais, as cristas de orientação para E-W representam 14% do total. Por fim, a classe menos frequente são as cristas orientadas para NE, com somente 6% de ocorrência, que se concentram na região norte (adjacente à praia) e na região central (Figura A5c).

No campo de dunas IC as cristas de orientação para NW representam 63% do total. Estão distribuídas por todas as regiões do campo e aparecem com maior

frequência nas regiões centrais e oeste. As cristas de orientação para N estão situadas heterogeneamente por todas as regiões do campo e representam 23% do total. As cristas com orientação para E-W representam 8% do campo e ocorrem nas regiões centrais e leste. Não há ocorrência na região oeste. Por último, as cristas com orientação para NE representam somente 6% do total e estão presentes em todas as regiões do campo, contudo, com mais frequência nas regiões leste (adjacente à baía do Caju) e central (próximo à praia) (Figura A5d).

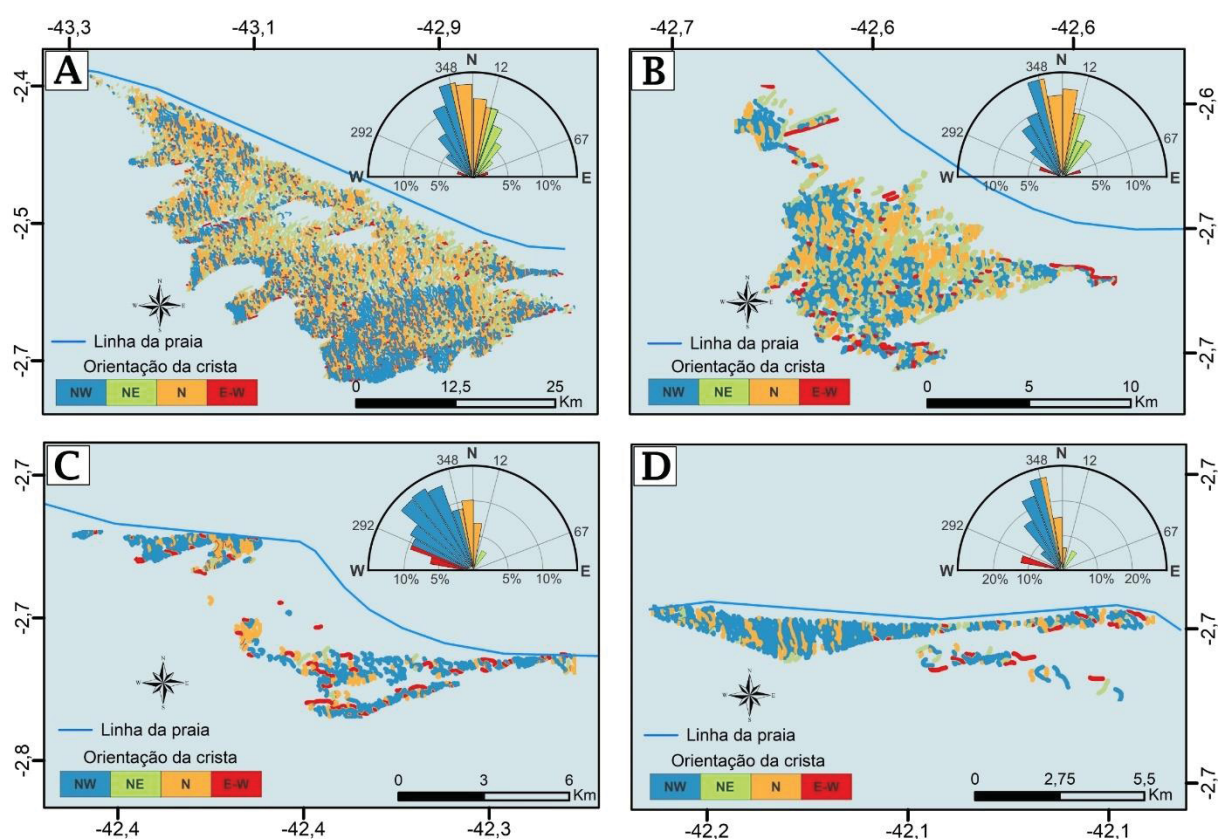


Figura A5 - Mapas de orientação de cristas com o diagrama de rosetas (na porção superior a direita) de cada campo de dunas. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.

4.4 Comprimento de crista

No campo de dunas dos LM foram mapeadas cerca de 7810 cristas, com comprimento de 5 a 4650 metros. As cristas menores que 450 metros de comprimento

representam a maior frequência de ocorrência, com 51% do total. Elas estão distribuídas por todas as regiões do campo, com menor ocorrência nas regiões sul e extrema leste, esta última adjacente à baía de São José. As cristas de 451 a 1400 metros representam 33% da proporção total do campo, estão distribuídas em todas as regiões do campo, porém, se concentram mais nas regiões oeste/noroeste, próximo à baía de São José, e a sul, na frente de avanço do campo sobre a vegetação. As cristas de comprimentos superiores a 1400 metros representam 16% e ocorrem em maior frequência nas regiões centrais, leste, oeste e sul, com pouca ocorrência na região norte do campo (Figura A6a).

Há ao todo 1630 cristas no campo de dunas PLM, com extensões no intervalo de 15 até 4010 metros. As cristas menores que 300 metros de comprimento representam um total de 40% no campo de dunas. Estão distribuídas por todas as regiões, com menores ocorrências no sul e leste do campo. Cristas com variações de 301 a 700 metros representam 45% total do campo, estão dispostas com maior frequência nas regiões sul e leste e menor frequência nas demais regiões do campo. Por último, com apenas 15% de representação total, as cristas maiores que 700 metros de extensão ocorrem em maior frequência nas regiões centrais e noroeste, com pouca ocorrência no sul (na frente transgressiva) e leste (Figura A6b).

No campo de dunas TT foram mapeadas um total de 475 cristas, com comprimentos de 15 até 1200 metros. As cristas com comprimentos inferiores a 250 metros representam 49% de todo o campo de dunas. Estão distribuídas por todas as regiões do campo, exceto na região central onde é identificada menor frequência. Com 37% de representatividade no campo, as cristas de 251 a 500 metros de comprimento estão dispostas com maior frequência nas regiões centrais, sul (ambas em contato com vegetação de alto porte) e noroeste (em contato com a praia). Na extremidade leste esse tamanho de crista ocorre raramente. Por fim, com apenas 15% de representatividade, as cristas superiores a 501 metros de comprimento ocorrem em maior frequência nas regiões centrais e sul, em contato com a vegetação de alto porte e o meandro de um rio (Figura A6c).

No campo de dunas IC foram identificadas um total 355 cristas que ocorrem no intervalo de 15 até 1400 metros de extensão. As cristas inferiores a 400 metros de comprimento representam cerca de 58% do campo de dunas. Ocorrem em maiores frequências na região central e prosseguem em direção leste (próximo à baía do Caju)

e na extremidade oeste, em contato com a desembocadura. As cristas de 401 a 900 metros representam cerca de 36%. Elas ocorrem em maior frequência na região central aumentam em direção a oeste. Já em direção a leste, há uma diminuição da frequência de ocorrência até na extremidade oeste (adjacente à baía do Caju) onde esse tamanho de crista volta a aparecer. Por fim, com ocorrência somente na região oeste, as cristas com mais de 900 metros de extensão representam apenas 6% (Figura A6d).

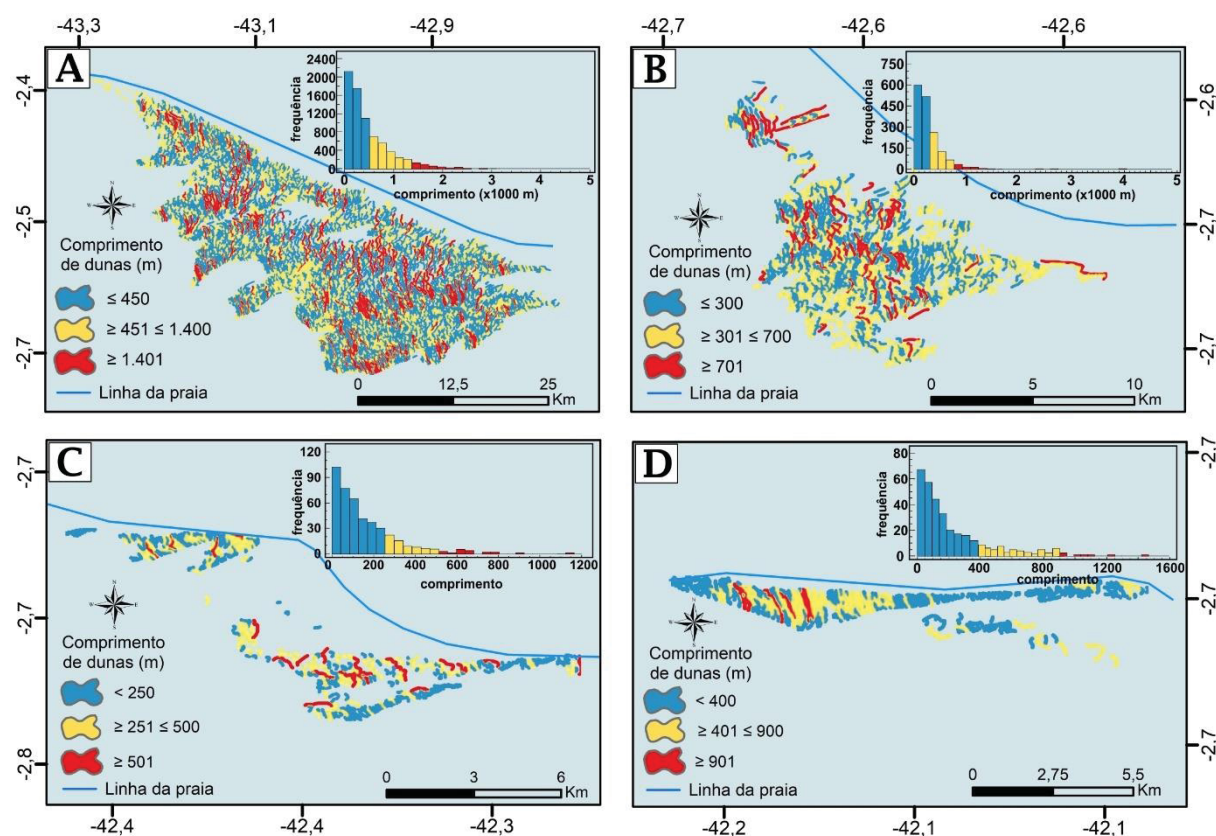


Figura A6 - Mapas dos comprimentos de cristas, discretizados em três classes definidos pelo histograma (canto superior a direita). A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.

4.5 Defeitos de crista

No campo de dunas dos LM as maiores densidades de defeitos de cristas estão concentradas adjacentes às regiões onde há presença da vegetação, nas bordas

leste, sudeste e sul. Já nas demais regiões, com maiores áreas, são encontradas menores densidades de terminações de dunas (Figura A7a).

As maiores densidades de defeitos de cristas nos PLM ocorrem pontualmente nas regiões leste, sul e noroeste, associadas com as bordas do campo. Já nas demais regiões do campo, onde compreendem a maior área, ocorrem as menores densidades de defeitos de cristas (Figura A7b).

No campo de dunas TT foram identificadas duas regiões com maiores densidades de defeitos de cristas. A primeira região compreende à região noroeste, em contato com a desembocadura, e a segunda, à região sudeste em contato com vegetação de médio e alto porte (Figura A7c).

No campo de dunas IC as maiores densidades de defeitos de cristas ocorrem em algumas regiões isoladas do campo, com maiores densidades nas regiões leste, centro e oeste. Nas demais regiões do campo se identificam baixas densidades de defeito de dunas (Figura A7d).

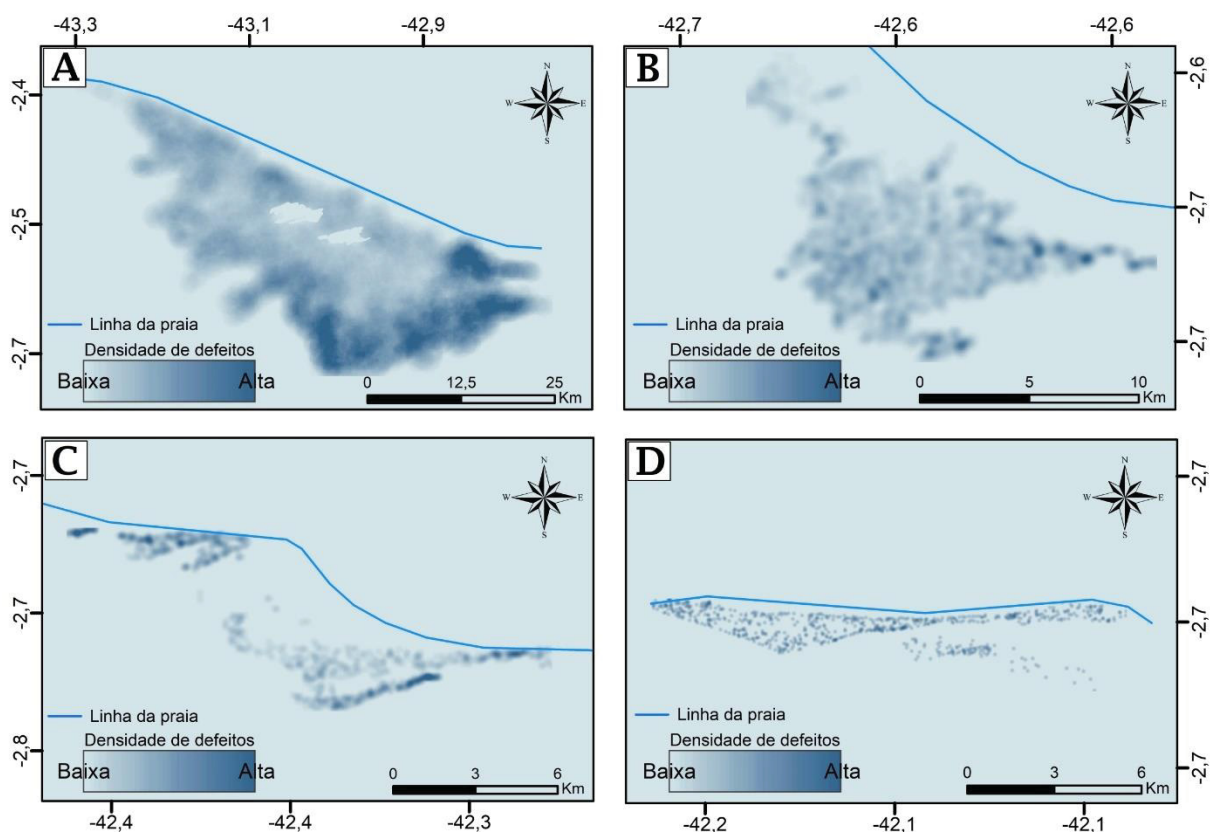


Figura A7 - Mapas com menores e maiores densidades de defeitos de crista dos campos de dunas A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.

4.6 Índice de sinuosidade de crista

No campo de dunas LM 76% das dunas foram classificadas como de baixa sinuosidade (Figura A8a). Elas são encontradas em todas as regiões do campo, com uma maior concentração nas bordas e frentes de avanço do campo. Nas regiões centrais se encontram as dunas com alta sinuosidade, com 24% do total de dunas. Essas dunas têm como característica braços alongados que apontam na direção contrária ao vento.

Semelhante ao campo de dunas descrito anteriormente, o campo de dunas dos PLM possui cerca de 77% de dunas classificadas como de baixa sinuosidade, ocorrem principalmente nas regiões mais próximas à praia e com menores ocorrências no centro do campo. As dunas com alta sinuosidade representam 23% do total e ocorrem predominantemente na região sul do campo com algumas ocorrências isoladas nas regiões central e norte, esta última em contato com a praia (Figura A8b).

No campo TT as dunas retilíneas representam a maior proporção do campo, com cerca de 76% do total das dunas. Ocorrem em maior frequência no “sub-campo” isolado na região noroeste, em contato com a praia, na região sul do campo na frente de avanço em contato com a vegetação e nas regiões leste e central, essa última em menor proporção. As dunas classificadas como de alta sinuosidade representam cerca de 24% das dunas do campo e ocorrem em maior frequência no centro e com uma pequena ocorrência no “sub-campo” isolado na região noroeste (Figura A8c).

No campo de dunas IC predominam as dunas retilíneas, com cerca de 94% de ocorrência em todo o campo. Estão dispostas em todas as regiões do campo. Já as dunas sinuosas ocorrem em apenas 6% e estão concentradas nas extremidades do campo e outras poucas no centro (Figura A8d).

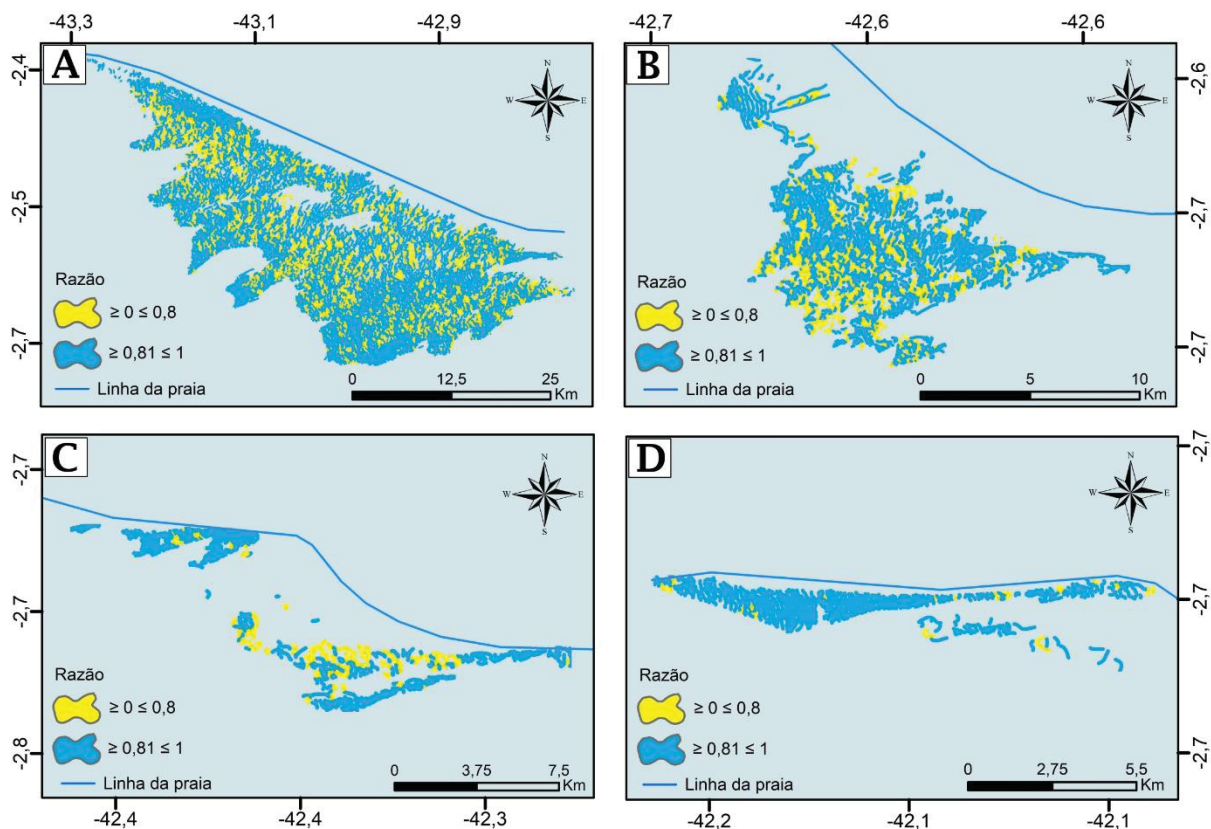


Figura A8 - Mapas dos índices de sinuosidade de dunas. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.

5 DISCUSSÃO

5.1 Parâmetros morfoplanimétricos e saldo (influxo/efluxo) sedimentar

As regiões com as maiores densidades de defeitos e menores espaçamento intercristas compreendem as menores áreas nos campos de dunas dos Lençóis Maranhenses, Pequenos Lençóis Maranhenses e Tutóia e estas apontam o primeiro cenário evolutivo onde as dunas estão menos interagentes e pouco evoluídas no tempo. Já as regiões com as menores densidades de defeitos de crista e maiores espaçamentos intercristas representam as maiores áreas nos campos de dunas dos Lençóis Maranhenses, Pequenos Lençóis Maranhenses e Tutóia e sugerem o

segundo cenário evolutivo, que diferente do primeiro cenário, os campos de dunas alcançaram seu ponto de equilíbrio em estabilidade, evolução e maturidade, e são mais facilmente alcançados nos campos menores e menos nos maiores (Ewing & Kocurek 2010).

5.1.1 *Lençóis Maranhenses (LM)*

Nos LM as regiões com maiores densidades de defeitos (Figura A4a) e dunas menos espaçadas (Figura A7a) estão localizadas nas extremidades leste, na região praial, sul e sudeste, na frente de avanço do campo (lobos deposicionais) e correspondem ao segundo cenário evolutivo. Essa frente de avanço do campo está em contato com a barreira física formada pela vegetação de alto porte, que restringe com que as dunas transgridam livremente e, com isso, resultam na aglomeração das dunas em forma de confinamento e sobreposição. Essa aglomeração reflete em maiores altitudes em tais regiões e em menores altitudes conforme se aproxima da região praial, onde as dunas estão mais livres e com isso formam um aspecto “rampa” na morfologia do campo de dunas (Figura A3a). Mesmo com a vegetação de alto porte nas regiões sul e sudeste, se tem a maior frente de avanço do campo dos Lençóis Maranhenses, possivelmente em resposta ao aporte sedimentar que entra pela praia (Giannini 2007), situada a montante das desembocaduras dos principais rios que lançam sedimentos para o mar e, com isso, condicionam um saldo influxo/efluxo mais positivo do que as demais regiões do campo, que encobre a vegetação com o tempo e transgride rumo ao interior.

O confinamento e empilhamento em tais regiões resultam em dunas com morfologia mais retilínea e orientadas preferencialmente para noroeste (Figura A5a), reflexo do regime unidirecional de vento efetivo proveniente de nordeste (Hilbert *et al.*, 2015) e de uma migração uniforme sem influência da vegetação que resulta em dunas com baixa sinuosidade (Figura A8a). Há também algumas menores ocorrências de orientações para norte e nordeste (Figura A5a) localizadas em regiões interdunares mais baixas que são suscetíveis a alagamentos mais frequentes e desenvolvimento de vegetação, fatores associados ao menor saldo influxo/efluxo. Essas regiões interdunares proporcionam uma migração não uniforme das dunas ocasionadas pela

diminuição da velocidade de avanço de uma das suas extremidades e refletem na assimetria morfológica com dunas com braços mais alongados, obliquidade e alta sinuosidade (Figura A8a) (Werner 1995, Kocurek & Ewing 2005). Essas baixas interações de dunas nessas regiões são corroboradas pela ocorrência, em maior proporção, e dunas com menores comprimentos (até 1.400m), com poucas ocorrências de dunas de grande comprimento (Figura A6a) que indicam que há uma baixa evolução do campo dunar.

As regiões com as menores densidades de defeitos (Figura A4a) e maiores espaçamentos de dunas (Figura A7a) ocorrem nas regiões praias, ao norte, nas centrais e em volta das duas grandes bacias deflacionares do campo, e na região a oeste, adjacente à baía de São José. Representam regiões com um menor saldo influxo/efluxo se comparado ao segundo cenário, que refletem em feições deflacionares e maiores planícies interdunares, a exemplo das duas grandes bacias deflacionares em meio ao campo o que indica um saldo influxo/efluxo negativo. Essas áreas correspondentes ao primeiro cenário (Ewing *et al.*, 2006, Kocurek *et al.*, 2010) possuem uma suavidade morfológica e pouca variação altimétrica e indicam que não há um empilhamento em meio ao campo de dunas, exceto na borda sul, onde são encontradas vegetações de alto porte que dificultam a migração livre das dunas correspondentes à frente de avanço do campo, semelhante ao segundo cenário discutido (Figura A3a). As dunas nessas regiões apresentam diferentes orientações sendo as mais frequentes de norte, nordeste, noroeste e leste-oeste, respectivamente (Figura A5a), indicam a influência de fatores externos ao regime de vento como a alta frequência de planícies interdunares e algumas áreas deflacionares que propiciam a assimetria morfológica das dunas e alta sinuosidade em meio ao campo de dunas, e menos nas bordas onde estão em contato com a vegetação, drenagem ou a praia, as quais favorecem a sua forma retilínea (Figura A8a). Por conta da alta interação entre as dunas nessa região, são encontrados os maiores comprimentos de dunas (acima de 1.401 m) em meio às dunas de menores comprimentos (Figura A6a).

5.1.2 Pequenos Lençóis Maranhenses (LM)

Nos PLM, diferentemente do campo anterior ocorrem maiores densidades de defeitos (Figura A4b) e menores espaçamentos de dunas (Figura A7b) nas regiões centrais do campo com algumas poucas ocorrências em regiões próximas à linha de costa. Tal fato indica que há nessas regiões uma baixa evolução do campo em decorrência do baixo saldo influxo/efluxo causado pela efetividade do vento, o qual favorece o efluxo e resulta na baixa interação entre dunas e estabelecimento de feições deflacionares como *lags* residuais e lençóis de areia (Hilbert *et al.*, 2015). Em ambas as regiões são identificados picos altimétricos que sugerem uma possível influência da vegetação, principalmente na região mais a oeste do centro do campo onde há presença de vegetação de alto porte nas margens em contato com a foz do rio Preguiças (Figura A3b). No centro do campo a presença dessa vegetação de pequeno porte junto com as planícies interdunares atuam como uma barreira física semelhante ao cenário do campo dos Lençóis Maranhenses, onde desaceleram e dificultam a migração dessas dunas e assim proporcionam dunas com maiores sinuosidades e orientações variadas. Essas variações na morfologia refletem nas heterogêneas orientações com maiores frequências para noroeste e menores para norte e nordeste (Figura A5b) e, favorecem, sob essas condições, o menor espaçamento intercristas e maior densidade de defeitos.

Por conta da presença de vegetação entre as dunas e da ausência de vegetação nas extremidades distais, as dunas apresentam maior sinuosidade, com braços alongados e formas assimétricas. Apresentam morfologias mais convexas que aumentam conforme avançam para o interior do campo e apresentam características mais deflacionares, uma vez que o saldo influxo/efluxo é baixo pela ausência da vegetação efetiva que “segura” os sedimentos e com isso chegam até as drenagens, situadas a sudoeste e favorecem o alto efluxo. Há também a ocorrência de dunas com baixa sinuosidade, morfologia mais retilínea, principalmente nas regiões mais proximais da praia (Figura A8b). Devido a essa baixa evolução as dunas apresentam, nas suas maiores frequências, pequenos comprimentos (até 700 m), porém, há também poucas dunas de grandes comprimentos, principalmente no centro do campo onde há um saldo influxo/efluxo maior (Figura A6b).

As regiões com a menor densidade de defeitos (Figura A4b) e maior espaçamento interdunas (Figura A7b) ocorrem nas bordas do campo, principalmente associadas às praias na região norte (acima da central) e com menor ocorrência no

meio do campo de dunas. Estão situadas em regiões com baixa variação altimétrica em resposta às dunas livres da influência da vegetação (Figura A3b) e estão condicionadas a um alto saldo influxo\efluxo, fatores que proporcionam maiores interações entre as dunas, assim, aumentam seu espaçamento intercristas, caracterizadas por grandes planícies interdunares, identificadas principalmente nas bordas proximais à praia. Por conta dessas planícies interdunares as dunas apresentam variadas orientações e morfologias com a maior frequência delas orientadas preferencialmente para noroeste, sendo perpendiculares à direção do vento proveniente de nordeste (Hilbert *et al.*, 2015). Porém, ocorrem também dunas com orientações para norte, leste-oeste e nordeste, com essa ordem decrescente de frequência, respectivamente (Figura A5b). Já a forma das dunas nessas regiões de planícies interdunares varia de dunas com baixa e alta sinuosidade (Figura A8b). A de baixa sinuosidade ocorre mais nas regiões proximais à praia e no interior do campo, onde o saldo influxo/efluxo é mais alto devido ao saldo sedimentar que passa pela planície deflacionar caracterizada pela ausência de dunas e com presença de *nebkhas*, protodunas e lençol de areia, situada a norte em contato com praia, o que aponta um baixo saldo influxo/efluxo nessa planície e com isso resultam em dunas retilíneas mais ao interior, menos truncadas e com baixa frequência de feições deflacionares entre elas. Já as dunas de alta sinuosidade são encontradas mais no interior do campo como nas regiões sul e sudoeste onde há uma grande frequência em feições deflacionares que indica um baixo saldo influxo\efluxo, uma vez que os sedimentos saem do campo de dunas pelas drenagens presentes nessas extremidades do campo, possibilitado pela ausência de uma vegetação densa efetiva para impedir esse efluxo, diferente do que ocorre nos LM. Devido às interações, há uma grande frequência de dunas com grandes comprimentos (acima de 700 m) intercaladas às dunas de menores extensões (Figura A6b).

5.1.3 Tutóia (TT)

No campo de dunas TT as maiores densidades de defeitos (Figura A4c) e baixo espaçamento intercristas (Figura A7c) estão situadas em duas regiões diferentes do campo. A primeira abrange todo o subcampo de dunas isolado a noroeste, próximo à

praia, confinadas pela vegetação de alto porte e pela drenagem situada a sudoeste (Hilbert *et al.*, 2015). O segundo, na região sul do segundo subcampo de dunas, na frente de avanço situada mais distal da praia. No primeiro subcampo há um alto saldo influxo/efluxo onde fornece um novo aporte sedimentar que entra pela praia alinhada com esse campo de dunas em questão e implicam em dunas mais recentes e menos interagentes entre si, em resposta pelo pouco tempo de interação, evolução e pelo confinamento dessas dunas pela vegetação e feições deflacionares situadas a sudoeste que fazem com que as dunas fiquem mais aglomeradas num menor espaço (Hilbert *et al.*, 2015). Já essa resposta no subcampo da região sul está associada à sobreposição de dunas que ocorre por conta da vegetação presente nesta região e que desacelera a frente de avanço das dunas transgressivas. Tanto as condições do primeiro quanto do segundo campo resultam em dunas de pequenos comprimentos (de até 500m) (Figura A6c) e os confinamentos em tais regiões proporcionam os dois maiores picos altimétricos do campo, que indicam que há um maior saldo influxo/efluxo nessas regiões que resulta no empilhamento de dunas (Figura A3c). Por conta desse confinamento as dunas mais frequentes possuem orientações mais alinhadas para noroeste em concordância com a direção preferencial de vento de nordeste. Porém, há também algumas outras poucas dunas orientadas para norte e leste-oeste (Figura A5c). As de orientação para norte estão associadas às dunas com braços alongados e assimétricos que resultam em alta sinuosidade (Figura A8c) ocasionadas pela interferência da migração livre delas proporcionadas pela vegetação e planície interdunas presentes em meio ao campo. As de orientação leste-oeste associadas às dunas das bordas do campo (Figura A5c).

Já as regiões de menores densidades de defeitos (Figura A4c) e maiores espaçamentos interdunas (Figura A7c) ocorrem no meio do subcampo de disposição leste/oeste situado mais a sul, entre as duas áreas correspondentes ao primeiro cenário. Possuem uma baixa variação altimétrica quando comparado ao campo como um todo (Figura A3c) e essas regiões são compostas pelas poucas planícies interdunares e pela variada feição de deflação. Esta última constituída por retrocordões e rastros lineares residuais envolvidas por uma densa vegetação, tanto no meio às dunas quanto nos arredores (Hilbert *et al.*, 2015), e indicam que há um baixo saldo influxo/fluxo. Por conta dessas planícies e deflações em meio ao campo as dunas possuem características assimétricas, prevalecem dunas com maior

frequência de alta sinuosidade e menor frequência de baixa sinuosidade Figura A8c). As variações nas orientações das dunas são dessa maneira facilitadas, com a maioria orientada para noroeste que se espacializa perpendicular à direção vento de nordeste e outras menores ocorrências seguem ordem decrescente de frequência de leste-oeste e norte, respectivamente. Essas duas últimas orientações correspondem às dunas com maiores assimetrias e com braços alongados devido a influência da vegetação em algumas regiões específicas (Figura A5c). Devido à região ser a de maior interação e evolução do campo de TT, as dunas apresentam maiores comprimentos (acima de 501 m), e há também ocorrência de dunas de menores extensão (Figura A6c).

5.1.4 Ilha Do Caju (IC)

O campo apresenta uma baixa variação altimétrica interna com alguns picos altimétricos na região sudoeste em resposta à vegetação presente no meio e a sul dessas dunas isoladas (Figura A3d). A vegetação restringe o avanço do campo nessa região e com isso influencia na orientação e morfologia das dunas. Porém, a maioria da frequência delas apresenta dunas de orientação alinhada para noroeste, sendo ainda mais frequente no campo de dunas de maior extensão situado mais proximal à praia, a norte. Tal orientação de dunas para noroeste é perpendicular à direção do vento de nordeste (Hilbert *et al.*, 2015). Ocorre também outra menor frequência de orientações para norte, leste-oeste e noroeste, respectivamente (Figura A5d).

Devido à alta frequência de dunas alinhadas para noroeste a maioria das dunas possui baixa sinuosidade o que reflete em dunas com morfologia mais retilínea (Figura A8d), e indica um alto saldo influxo/efluxo por todo o campo e ausência de feições erosivas deposicionais. Por conta da restrição do tamanho do campo imposta pela vegetação e pela drenagem situada a sudoeste, as dunas apresentam pouca complexidade e variação no seu comprimento, com a maior frequência delas sendo de dunas pequenas (abaixo de 900m) e com pouca frequência com dunas grandes (Figura A8d).

Diferentemente dos três campos de dunas discutidos anteriormente o campo de dunas IC apresenta um maior estágio de evolução, maturidade e equilíbrio,

visualizados a partir do mapa de densidade de defeitos de cristas (Figura A4d) e espaçamento intercristas (Figura A7d), os quais destacam todas as regiões do campo como homogêneas nesses dois parâmetros.

5.2 Condições limites eólicos costeiros

Dentre os parâmetros morfoplanimétricos analisados, os dados de densidades de defeitos de dunas e espaçamento intercristas apresentam correlação negativa, excetuando-se para o campo Ilha do Caju, este com correlação fracamente positiva (Figura A9). Observa-se, para a relação entre defeitos de dunas e espaçamento intercristas que há um decréscimo no coeficiente de correlação *Pearson* dos campos maiores para os menores, com valor muito expressivo para o campo dos Lençóis Maranhenses (-0,95) e correlações fracas no campo dos Pequenos Lençóis Maranhenses (-0,38) e no de Tutóia (-0,32). Essa relação observada entre densidades de defeitos de dunas e espaçamento intercristas é consistente a dois cenários estabelecidos em trabalhos anteriores (Ewing *et al.*, 2006, Kocurek *et al.*, 2010): o primeiro indica que em regiões onde há maior densidade de defeitos há também um baixo espaçamento intercristas, e o segundo indica que em regiões onde há baixa densidade de defeitos há também um alto espaçamento intercristas (Werner & Kocurek 1999, Kocurek & Ewing 2005, Derickson *et al.*, 2008).

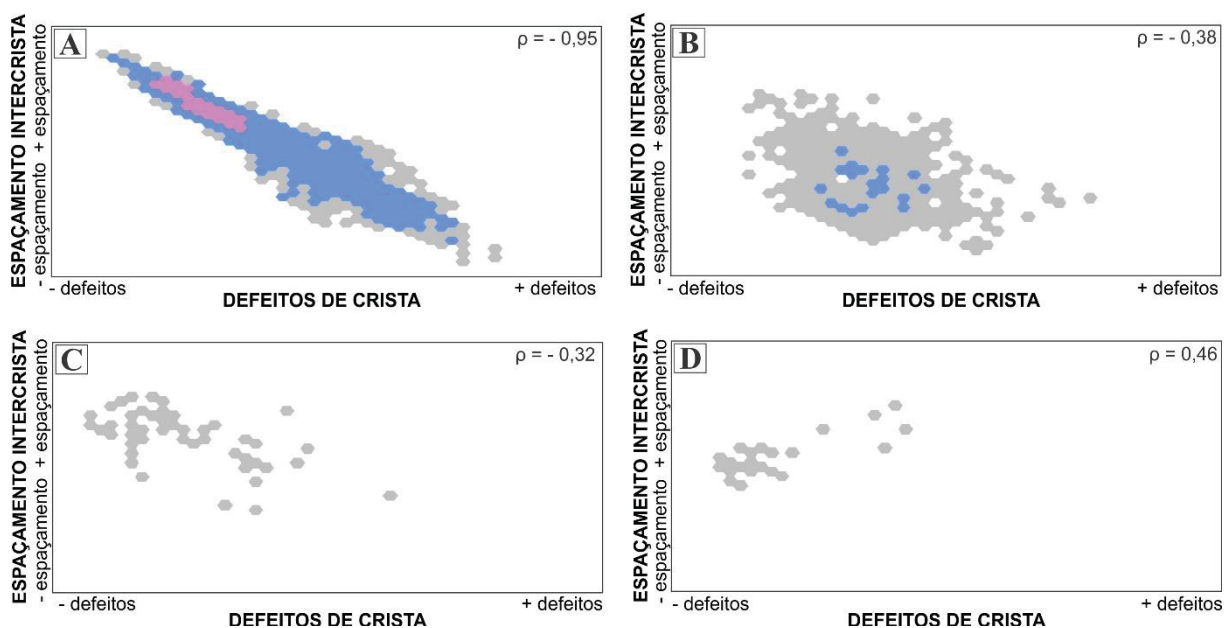


Figura A9 - Correlações dos dados de espaçamento intercristas e densidade defeitos de crista, com o coeficiente de correlação Pearson (ρ) (no canto superior direito) para cada campo de dunas. Os pontos rosas representam maiores concentrações de dados, os azuis representam média concentrações, e os cinzas, baixas concentrações. A) Lençóis Maranhenses; B) Pequenos Lençóis Maranhenses; C) Tutóia; e D) Ilha do Caju.

Os campos de dunas dos LM, PQM e TT apresentam alta complexidade nas disposições espaciais das dunas e tal complexidade dificulta a correlação direta entre os parâmetros morfoplanimétricos, a exemplo do parâmetro do comprimento da duna que é uma variável não tão bem representativa e correlacionável com cenário evolutivo (Ewing *et al.*, 2006; Derickson *et al.*, 2008). Essa complexidade se dá uma vez que esses depósitos eólicos foram reiniciados na última transgressão e estabilização ocorrida no quaternário (Guedes *et al.*, 2017) e com isso ocorrido até o presente momento mudanças climáticas que implicaram na alteração das condições limites locais e regionais que implicam nesses padrões.

O tempo de evolução e o desequilíbrio dos campos aumentam conforme aumenta a extensão da área do campo, sendo os campos maiores em extensão menos evoluídos do que os menores (Giannini 2007). Estes campos mais extensos possuem evolução heterogênea dentro do sistema, diferentes dos campos de menores extensões que alcançam mais rapidamente a homogeneidade evolutiva (Ewing & Kocurek 2010), a exemplo do IC que apresenta alta evolução e equilíbrio e difere dos LM (Giannini 2007), PQM e TT, estes ainda em desequilíbrio.

Essa alta evolução no campo TT é potencializada principalmente pela condição limite geométrica ser bem mais delimitada e restringida pela vegetação e drenagens nas bordas. Esse limite geométrico torna o espaço de acomodação sedimentar menor do que os demais campos e por conta da fonte de sedimento linear típica ser proveniente da praia (Ewing & Kocurek 2010) e homogênea nesse campo, uma vez que a linha de costa é perpendicular à disposição do sistema eólico, essas condições propiciaram a mais rápida evolução do campo que reflete na homogeneização e agrupamento uniforme das dunas e formam um único padrão perpendicular ao regime unidirecional de nordeste em questão (Hilbert *et al.*, 2015). Esse padrão homogêneo

implica na baixa frequência ou inexistência de bacias deflacionares (Giannini *et al.*, 2014) em meio às dunas e também na baixa frequência de planícies interdunares, uma vez que o espaço de acomodação é restrito e com isso o equilíbrio sedimentar ocorre mais rápido que resulta na remoção das zonas de deflações com o tempo e, resulta em dois elementos dentro do campo: praia duna e frente de avanço (Giannini 2007, Giannini *et al.*, 2014).

Já nos campos de maiores extensões, a exemplo dos LM, PLM e TT esses limites geométricos são maiores, em termos de área, espaço de acomodação e estocagem de sedimento, o que propicia a atuação de variáveis em meio ao campo influenciadoras na evolução diferenciada e que indica uma configuração de desequilíbrio, a exemplo dos LM (Giannini 2007). Tais variáveis, que implicam na evolução diferenciada do campo, proporcionam dunas com variadas orientações e variadas simetrias e formas, mesmo sob um regime de vento unidirecional de nordeste (Hilbert *et al.*, 2015). Essas variáveis atuantes podem ser mais facilmente identificadas nas regiões mais evoluídas dos maiores campos, através da alta ocorrência das bacias deflacionares em meio às dunas e grandes planícies interdunares que indica um menor saldo influxo/efluxo se comparado às regiões menos evoluídas. Tais bacias deflacionares e planícies interdunares ocorrem pela maior interação das dunas e por conta da ausência ou ineficiência da vegetação nas bordas dessas regiões do campo, que não impede com que o sedimento fique estocado dentro do campo e isso propicia um baixo saldo influxo/efluxo e a ocorrência dos três elementos do campo: praia duna, bacia deflacionar e frente de avanço (Giannini 2007, Giannini *et al.*, 2014). Já as regiões menos evoluídas são caracterizadas pela pouca ou nenhuma ocorrência das bacias deflacionares e pelas pequenas áreas de planícies interdunares. Isso devido ao saldo influxo/efluxo ser alto, proveniente de fontes lineares, e pelo limite geométrico ser restringido pela vegetação eficiente que desacelera o avanço do campo e faz com que as dunas fiquem mais agrupadas e, com isso, preencham as zonas deflacionares e diminuam as áreas das planícies interdunares com o tempo, a exemplo da região sul e sudeste dos LM.

As planícies interdunares atuam como variáveis capazes de causar variações nos padrões dunas e são mais atuantes nas regiões de maior evolução do campo, nos quais em períodos sazonais com a elevação do lençol freático essas planícies são alagadas e propiciam o estabelecimento de vegetação e com isso desaceleram a

velocidade de migração e causam assimetria nas dunas. Já em período que essas planícies secam os sedimentos do fundo são disponibilizados para o retrabalhamento o que indica fontes de geometrias planares (Hilbert *et al.*, 2015).

6 CONCLUSÕES

Os campos de dunas de menores extensões são menos complexos em interpretação evolutiva e são de mais rápida estabilidade na evolução do sistema, por conta do seu limite geométrico ser mais restringido em área.

O parâmetro morfoplanimétrico do comprimento de crista não é uma variável tão representativa e de direta correlação nos campos de dunas, aumenta a não representatividade conforme aumenta a extensão da área do campo de dunas.

O parâmetro morfoplanimétrico da orientação das dunas é a variável mais complexa dentro dos parâmetros, uma vez que a vegetação pode influenciar a orientação da duna e mudar a obliquidade em relação ao vetor do vento.

Diferente do que é afirmado por Kocurek & Ewing (2006), o vento não é a única variável condicionante do tipo de duna. As condições antecedentes como: vegetação no meio do campo e nas bordas e planície interdunar podem influenciar nas características morfológicas das dunas. Isso é mais bem observado em campo de dunas de maiores extensões, a exemplos dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis Maranhenses.

Dunas com alta sinuosidade podem não ser em resposta unicamente de um sistema com baixo saldo influxo/efluxo, mas pode estar relacionada à vegetação e as planícies interdunares em meio às dunas e fazem com que as dunas migrem mais lentamente e com isso fiquem com os braços alongados e assimétricos.

7 AGRADECIMENTO

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de mestrado.

8 REFERÊNCIAS

- BENTZ, D. & GIANNINI, P. C. F. 2003. Interpretação aerofotogeomorfológica da planície costeira de Una-Juréia, municípios de Peruíbe-Iguape, SP: modelo evolutivo e origem da erosão na praia da Juréia. In: Congresso da associação brasileira de estudos do quaternário (ABEQUA). 9, Recife, PE. Anais... meio digital (CD). ABEQUA.
- BEVERIDGE, C.; KOCUREK, G.; EWING, R.C.; LANCASTER, N.; MORTHEKAI, P.; SINGHVI, A.K.; MAHAN, S.A. 2006. Development of spatially diverse and complex dune-field patterns: Gran Desierto dune field, Sonora, Mexico. *Sedimentology* 53, 1391–1409.
- BISHOP, S.R.; MOMIJI, H.; CARRETO-GONZÁLEZ, R.; WARREN, A. 2002. Modelling desert dune fields based on discrete dynamics. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. Vol. 7(1), 7-17.
- CARTER, E.W.G. 1988. Coastal environments: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. Academic Press. 617 p.
- DERICKSON, D.; KOCUREK, G.; EWING, R.C.; BRISTOW, C. 2008. Origin of a complex and spatially diverse dune-field pattern, Algodones, southeastern California. *Geomorphology* 99, 186-204.
- EASTWOOD, E.; NIELD, J.; BASS, A.; KOCUREK, G. 2011. Modelling controls on aeolian dune-field pattern evolution. *Sedimentology*. 58, 1391–1406.
- EWING, R.C.; KOCUREK, G.; LAKE, L.W. 2006. Pattern analysis of dune-field parameters. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 1176-1191.
- EWING, R.C. & KOCUREK, G. 2010. Aeolian dune-field pattern boundary conditions. *Geomorphology*. v 114. p 175-187.
- GIANNINI, P.C.F. 2007. Sistemas deposicionais eólicos no Quaternário costeiro do Brasil. Tese livre docência. Instituto de geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo. 224p.
- GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; MARTINHO, C.T.; TATUMI, S.H. 2007. Eolian depositional episodes controlled by late Quaternary relative sea level changes on the Imbituba-Laguna coast (southern Brazil). *Marine Geology*. 237, 143–168.

- GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; MARTINHO, C.T.; GUEDES, C.C.F.; NASCIMENTO, D.R.; TANAKA, A.P.B.; MENDES, V.R.; ZULAR, A.; ANDRADE, H.A.A.; FORNANI, M. 2011. Classificação e dinâmica de feições eólicas costeiras: um modelo sistêmico baseado em exemplos brasileiros. In: *XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA)*. 5p.
- GONÇALVES, R.A.; LEHUGEUR, L.G.O.; CASTRO, J.W.A.; PEDROTO, A.E.S. 2003. Classificação das feições eólicas dos lençóis Maranhenses-Maranhão-Brasil. Fortaleza: UFC. Mercator. n.3, p.99-112.
- GUEDES, C.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; GIANNINI, P.C.F.; DeWITT, R.; AGUIAR, V.A.P. 2013. Luminescence characteristics of quartz from Brazilian sediments and constraints for OSL dating. *Brazilian Academy*. 1303-1316.
- GUEDES, C.C.F.; GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; DE WITT, R.; AGUIAR, V.A.P. 2017. Weakening of northeast trade winds during the Heinrich stadial 1 event recorded by dune field stabilization in tropical Brazil. *Quaternary Research*. Cambridge University Press. p. 1-13.
- HESP, P.A.; MAIA, L.P.; CLAUDINO-SALES, V. 2009. The holocene barriers of Maranhão, Piauí and Ceará states, northeastern Brazil. In: DILLENBURG, S.; HESP, P. *Geology and geomorphology of holocene coastal barriers of Brazil*. Springer. Chapter 10, 325-345.
- HILBERT, N.N.; GUEDES, C.C.F.; GIANNINI, P.C.F. 2015. Morphologic and sedimentologic patterns of active aeolian dune-fields on the east coast of Maranhão, northeast Brazil. *Earth Surface Process and Landforms*. 11.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1992. Atlas nacional do Brasil. Rio de Janeiro.
- JIMENEZ, J.A.; MAIA, L.P.; SERRA, J.; MORAIS, J.O. 1999. Aeolian dune migration along the Ceará coast, north-eastern Brazil. *Sedimentology*, 46: 689-701.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, B.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.; JOSEPH, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77(3): 437–471.

- KOCUREK, G.; EWING, R.C. 2005. Aeolian dune field self-organization - implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. *Geomorphology*. 72, 94-105.
- KOCUREK, G.; EWING, R.C.; MOHRIG, D. 2010. How do bedform pattern arise? new views on the role of bedform interactions within a set of boundary conditions. *Earth surface processes and landforms*. 35, 51-63.
- LEVIN, N.; TSOAR, H.; MAIA, L.P.; CLAUDINO-SALES, V.; HERMANN, H. 2008. Lagoas costeiras interdunares e branqueamento de dunas no nordeste brasileiro. *Mercator, Fortaleza*, v. 7, n. 14, p. 143-166.
- LUNA, M.C.M.M.; PARTELI, E.J.R.; HERRMANN, H.J. 2012. Model for a dune field with an exposed water table. *Geomorphology*. 169–177.
- MARTINÉZ, M.L.; PSUTY, N.P.; LUBKE, R.A. 2004. A Perspective on coastal dunes. In: MARTINÉZ, M.L. PSUTY, N.P. *Coastal dunes - ecology and conservation*. Springer. Vol 171. 26-33.
- MARTINHO, C.T.; DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. 2008. Mid to late Holocene evolution of transgressive dunefields from Rio Grande do Sul coast, southern Brazil. *Marine Geology*. 256, 49–64.
- McKEE, E.D. 1979. A study of global sand seas. U.S. Geological Survey, Professional papers, 1052: 423p.
- MELO, A.B.C.; CAVALCANTI, I.F.A.; SOUZA, P.P. 2009. Zona de convergência intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I.F.A. *et al.* (Eds). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 25-39.
- MENDES, V.R.; GIANNINI, P.C.F; GUEDES, C.C.F.; DeWITT, R.; ANDRADE, H.A.A. 2015. Central Santa Catarina coastal dunefields chronology and their relation to relative sea level and climatic changes. *Brazilian Journal of Geology*, 45:79-95.
- MMA/IBAMA. 2003. Plano de Manejo do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. São Luís, 499p.
- NIMER, E. 1989. *Climatologia do Brasil*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil.
- NISHMORI, H.; YAMASAKI, M.; ANDERSEN, K.H. 1998. A simple model for the various pattern dynamics of dunes. *International Journal of Modern Physics B*. 12(3) 257-272.

- PARTELI, E.J.R.; SCHWÄMMLE, V.; HERRMANN, H.J.; MONTEIRO, L.H.U.; MAIA, L.P. 2006. Profile measurement and simulation of a transverse dune field in the Lencois Maranhenses. *Geomorphology* 81, 29-42.
- SAWAKUCHI, A.O. 2006. Morfometria e simulação numérica de campos de dunas costeiras: estudo baseado em exemplos brasileiros. Tese de doutoramento. Instituto de geociências. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar. Universidade de São Paulo. 319p.
- SILVA, M.S.; HESP, P.A. 2013. Increasing rainfall, decreasing winds, and historical changes in Santa Catarina dunefields, Southern Brazil. *Earth Surface Process and Landforms*. 38. 1036-1045.
- SILVERMAN, B.W. 1986. Density estimation for statistics and data analysis. New York: Chapman and Hall. 170p.
- TOMAZELLI, L.J.; DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C. 2008. Geomorfologia e potencial de preservação dos campos de dunas transgressivos de cidreira e Itapeva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Pesquisas em Geociências*, 35(2): 47-55.
- TSOAR, H.; LEVIN, N.; PORAT, N.; MAIA, L.P.; HERRMANN, H.J.; TATUMI, S.H.; CLAUDINO-SALES, V., 2009. The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quaternary Research* 71, 217-226.
- TSOAR, H. 2004. Sand dunes. In: HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C.; POWLSON, D.; SCOW, K.; SINGER, M.; SPARKS, D. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. (3ª edição). Elsevier, Oxford, p. 462-471.
- TSOAR, H. 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A*. 357, 50–56.
- VALERIANO, M.M.; ALBUQUERQUE, P.C.G. 2010. Topodata: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais. 79p.
- WATSON, D.F., & PHILIP, G.M. 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing*, 2:315–327.
- WERNER, B.T.; KOCUREK, G. 1999. Bedform spacing from defect dynamics. *Geology*. v. 27; no. 8; p. 727–730.

WERNER, B.T. 1995. Eolian dunes: computer simulations and attractor interpretation. *Geology*. v. 23; n.12; p. 1107–1110.

WILKINS, I.G.; FORD, R.L. 2007. Nearest neighbour methods applied to dune field organization: the Coral Pink Sand Dunes, Kane Country, Utah, USA. *Geomorphology*, 83: 48-57.

6.2 RESULTADOS PARCIAIS DO TREINAMENTO DO ALGORITMO

1. TREINAMENTO DO ALGORITMO

A partir do banco de dados pré-definido foi executado o treinamento do algoritmo para a classificação semiautomatizada das dunas.

Dentre as oito variáveis de entrada, as variáveis correspondentes às bandas 2 e 7 apresentaram correlações muito fortes de informações com as demais bandas. Observadas tanto pela matriz de correlação, quanto pelo *components plots*. Essas correlações indicam variáveis com informações redundantes para o algoritmo. Já as demais variáveis: 1, 3, 4, 5, 6 e DUNAS apresentam uma correlação menor entre as demais variáveis, assim, contribuem com que o algoritmo represente bem as informações de interesse. Esses valores podem ser observados por meio de uma matriz de correlação (Tabela 1).

Tabela 1 - Matriz de correlação com as similaridades entre as variáveis.

	BANDA 1	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	BANDA 6	BANDA 7	DUNAS
BANDA 1	100%	-	-	-	-	-	-	-
BANDA 2	100%	100%	-	-	-	-	-	-
BANDA 3	99,3%	99,5%	100%	-	-	-	-	-
BANDA 4	99,1%	99,3%	100%	100%	-	-	-	-
BANDA 5	88,2%	88,3%	87,9%	87,5%	100%	-	-	-
BANDA 6	97,6%	97,8%	98,5%	98,6%	93,4%	100%	-	-
BANDA 7	98,5%	98,7%	99,4%	99,4%	91%	99,7%	100%	-
DUNAS	80,6%	80,8%	80,4%	80,4%	73%	80,4%	80,7%	100%

Os dados de altas e baixas correlações entres as variáveis usadas no estudo também podem ser observados na forma gráfica, por meio das *components plots* (Figura 19).

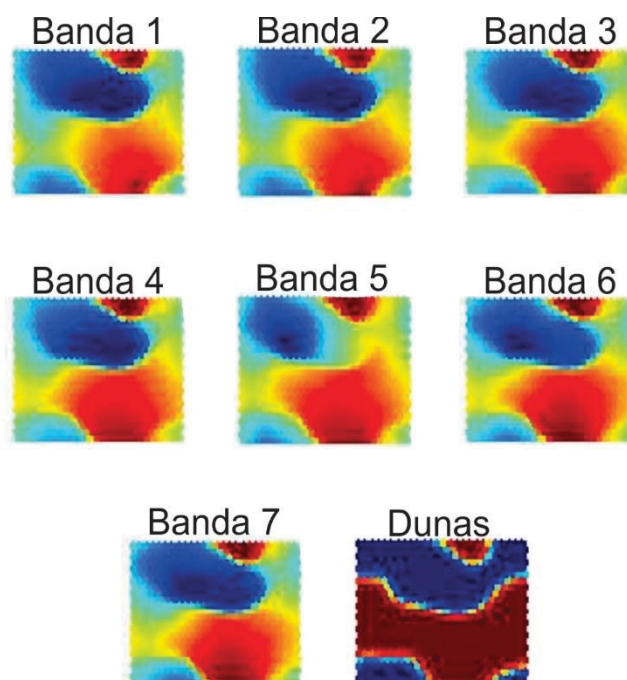


Figura 19 - *Components plot* com as variáveis de entrada utilizadas no treinamento SOM.

A partir da matriz-u foi possível observar a representação de regiões de maiores e menores similaridades do mapa auto-organizável (Figura 20). Uma escala temperatura/cor é usada para identificar dois grupos conforme suas distribuições de similaridades.

A partir disso foram identificados dois grupos na matriz. Os neurônios com maiores similaridades separados por neurônios mais dissimilares representam amostras pertencentes a grupos diferentes. O primeiro grupo inclui as amostras que estão dentro do polígono perfeito e a segunda as que estão fora do polígono.

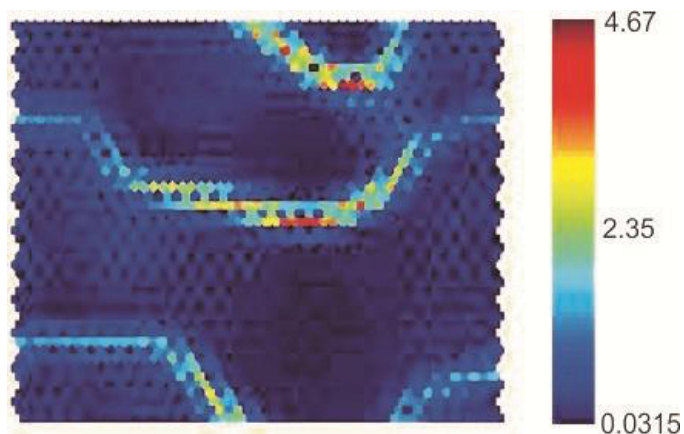


Figura 20 - Matriz-U com os dois grupos de amostras. As cores frias (tons de azul) representam neurônios adjacentes com maior similaridade, já as cores quentes (tons de vermelho) indicam maior distância ou separação euclidiana, ou ainda, neurônios com maior dissimilaridade.

Com os dados de saída preditos pelo algoritmo treinado é possível notar que o treinamento apresentou resultado satisfatório, o qual é possível distinguir os componentes dentro do campo de dunas que contêm a identidade espectral de areia (dunas) e os espectros que representam os demais componentes dentro do campo dunar (Figura 21).

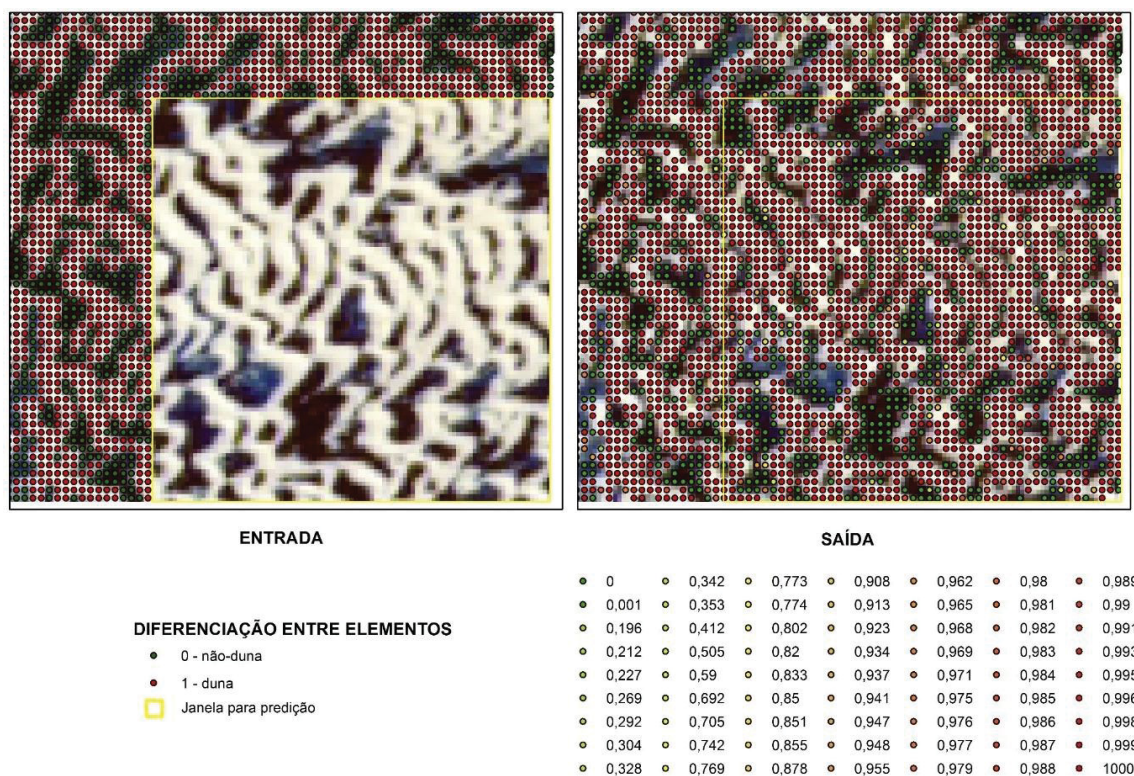


Figura 21 - Resultado do treinamento do algoritmo SOM que compara os dados de entrada e de saída. Os valores de saída preditos (quadrado amarelo) mais próximos de 1 representam informações espectrais de dunas. Já os valores mais próximos de 0 representam os demais componentes do campo (não-duna).

2. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO TREINAMENTO DO ALGORITMO

Para o primeiro treinamento da classificação semiautomatizada das cristas de dunas foi utilizada a variável de entrada do tipo “cristas de dunas”, representada por linhas e não por polígonos como apresentado. Porém, o resultado do treinamento foi insatisfatório, por essa variável de “crista de dunas” não ter uma alta representatividade dentro do corpo da duna, necessário na etapa da sobreposição com os *pixels* das bandas, apresentam assim, resultados inconsistentes com o objetivo de estudo. Já com a utilização dos dados de “DUNAS”, representados por polígonos, os resultados foram satisfatórios com o algoritmo treinado que distingue os *pixels* equivalentes às dunas e os *pixels* equivalentes a outros elementos do campo de dunas.

Algumas etapas estão pendentes, como: um novo treinamento do algoritmo sem as duas bandas óticas com correlações muito fortes: bandas 2 e 7. A partir disso, será possível finalizar o algoritmo de classificação de dunas, e logo após, a próxima etapa será a de geração do centróide desses dados, o qual representará as cristas de dunas em forma de um vetor central representado por linha, baseado no algoritmo elaborado por Nyberg *et al.* (2015), representados pela (Figura 22).

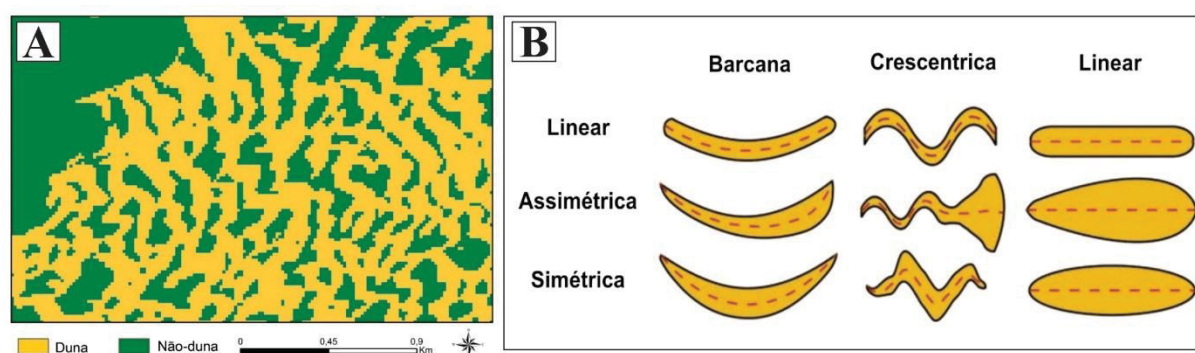


Figura 22 - A) Resultado gerado pelo algoritmo treinado que distingue regiões com dunas e não-dunas. B) Próxima etapa para a extração dos centróides dos polígonos das dunas, os quais representarão as cristas das dunas. Adaptado de Nyberg *et al.* (2015).

7. CONSIDERAÇÕES GERAIS DA DISSERTAÇÃO

Os quatro campos de dunas de estudos apresentam alta complexidade em termos de evolução. Essa complexidade se dá devido aos diversos fatores influenciadores dos campos entendidos como “condições limites do sistema” terem sido dinâmicos ao longo do tempo, o qual pode se concluir que os campos de menores extensões tendem a ser menos complexos e ao mesmo tempo são de mais rápida evolução uniforme e estabilidade evolutiva, devido ao seu limite geométrico ser restrito a uma área menor e mais bem definido. Já os campos maiores tendem a levar mais tempo para uma evolução e evolução uniforme devido a seu limite geométrico ser mais abrangente em termos de área.

Os parâmetros morfoplanimétricos já consagrados em trabalhos anteriores, se mostraram ser um método eficiente e satisfatório para o estudo de evolução dos sistemas eólicos costeiros em questão, uma vez que a partir deles é possível estudar as diferentes populações e padrões de dunas e, com isso, segregando e entender as diferentes fases evolutivas internas que um campo de dunas pode ter, a exemplo dos Lençóis Maranhenses onde é evidenciado que há duas diferentes fases evolutivas dentro de um mesmo campo e que essa diferença evolutiva tende a não existir em campos menores, como a exemplo do campo da Ilha do Caju.

O treinamento do algoritmo baseado em técnicas de redes neurais apresentou um resultado satisfatório no reconhecimento e na diferenciação de elementos dentro de um campo de dunas, a exemplo na diferenciação do que é dunas e o que não é, porém, ainda é necessário aplicar um método para a extração das cristas das dunas que servirão posteriormente, para a extração dos parâmetros morfoplanimétricos.

REFERÊNCIAS

- BAGNOLD, R.A. 1941. The physics of blown sand and desert dunes. Chapman and Hall, London, 266p.
- BATEMAN, M.D.; CARR, A.S.; DUNAJKO, A.C.; HOLMES, P.J.; ROBERTS, D.L.; MCLAREN, S.J.; BRYANT, R.G.; MARKER, M.E.; MURRAY-WALLACE, C. 2010. The evolution of coastal barrier systems: a case study of the Middle-Late Pleistocene wilderness barriers, South Africa. *Quaternary Science Reviews* 30, 63–81.
- BENTZ, D.; & GIANNINI, P.C.F. 2003. Interpretação aerofotogeomodológica da planície costeira de Una-Juréia, municípios de Peruíbe-Iguape, SP: modelo evolutivo e origem da erosão na praia da Juréia. In: Congresso da associação brasileira de estudos do quaternário (ABEQUA). 9, Recife, PE. Anais... meio digital (CD). ABEQUA.
- BEVERIDGE, C.; KOCUREK, G.; EWING, R.C.; LANCASTER, N.; MORTHEKAI, P.; SINGHVI, A.K.; MAHAN, S.A. 2006. Development of spatially diverse and complex dune-field patterns: Gran Desierto Dune Field, Sonora, Mexico. *Sedimentology* 53, 1391–1409.

- BIGARELLA, J.J. 1972. Eolian environments: their characteristics, recognition, and importance. In: RIGBY, J.K & HAMBLIN, W.K. *Recognition of Ancient Sedimentary Environments*, Society of Economic Palenotologist Mineralogists, p. 12-62.
- BISHOP, S.R.; MOMIJI, H.; CARRETO-GONZÁLEZ, R.; WARREN, A. 2002. Modelling Desert Dune Fields Based on Discrete Dynamics. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. Vol. 7(1), 7-17.
- BRUUN, P. 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *American Society of Civil Engineers Proceedings. Journal of Waterways and Harbors Division*, New York, v. 88, p. 117-130.
- CARNERIO, C.C. 2010. Modelagem espacial de dados aerogeofísicos e interpretação de imagens SAR aplicados ao mapeamento geológico e metalogenético da região central do Domínio Bacajá, Estado do Pará. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. 160p.
- CARTER, E.W.G. 1988. Coastal environments: An Introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. Academic Press. 617 p.
- CLAUDINO-SALES, V.; PEULVAST, J.P. 2002. Dunes generations and ponds on the coast of Ceará, North-East Brazil. In: ALLISON, R. *Applied Geomorphology*. London, John Wiley & Sons, p. 443-460.
- COOPER, W.S. 1958. The coastal sand dunes of Oregon and Washington. Tulsa, Okla, Geological Society America. 169p.
- DEEVEY, E.S.; & FLINT, R.F. (1957). Postglacial hypsithermal interval. *Science*, vol. 125, p. 182-184
- DERICKSON, D.; KOCUREK, G.; EWING, R.C.; BRISTOW, C. 2008. Origin of a complex and spatially diverse dune-field pattern, Algodones, southeastern Califórnia. *Geomorphology* 99, 186-204.
- EWING, R.C.; KOCUREK, G. 2010. Aeolian dune-field pattern boundary conditions. *Geomorphology Amsterdam*. v. 114. p 175-187.
- EWING, R.C.; KOCUREK, G.; LAKE, L.W. 2006. Pattern analysis of dune-field parameters. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 1176-1191.
- EWING, R.C.; McDONALD, G.D.; HAYES, A.G. 2015. Multi-spatial analysis of aolian dune-field patterns. *Geomorphology*. 240:44-53.

- GARDNER, D.E. 1955. Beach-sand heavy-mineral deposits of eastern Austrália. BMR Bulletin, 28, 103p.
- GIANNINI P.C.F.; SAWAKUCHI A.O.; MENDES V.R.; ZULAR A.; ANDRADE, H.A.A.; MARTINHO, C.T.; GUEDES, C.C.F.; NASCIMENTO Jr, D.R.; TANAKA A.P.B.; FORNARI, M. 2014. Morfodinâmica de sistemas eólicos costeiros: um modelo baseado em exemplos do Holocênico brasileiro e seu potencial interpretativo. *Comunicações Geológicas* 101(2): 681-685.
- GIANNINI, P.C.F. & SANTOS, E.R. 1994. Padrões de variação espacial e temporal na morfologia de dunas da orla costeira no centro-sul catarinense. *Boletim paranaense de geociências.*, 42:73-95.
- GIANNINI, P.C.F. 2007. Sistemas Depositionais eólicos no Quaternário costeiro do Brasil. Tese livre docência. Instituto de geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo. 224p.
- GIANNINI, P.C.F.; ASSINE, M.L.; BARBOSA, L.; 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 eólicas costeiras e interiores. In: SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, P.E.; OLIVEIRA, A.M. *Quaternário do Brasil*. ABEQUA, Holos editora, p. 235-257.
- GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; MARTINHO, C.T. 2001. O nível do mar e as dunas eólicas no litoral centro-sul catarinense: um modelo de estratigrafia de sequências no Quaternário. In: *Congresso da associação brasileira de estudos do quaternário*. 8, Imbé, RS. Boletim de Resumos... Porto Alegre, ABEQUA, p. 45-46.
- GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; MARTINHO, C.T.; GUEDES, C.C.F.; NASCIMENTO, D.R.; TANAKA, A.P.B.; MENDES, V.R., ZULAR, A.; ANDRADE, H.A.A.; FORNANI, M. 2011. Classificação e dinâmica de feições eólicas costeiras: um modelo sistêmico baseado em exemplos brasileiros. In: *XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA)*. 5p.
- GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; MARTINHO, C.T.; TATUMI, S.H. 2007. Eolian depositional episodes controlled by Late Quaternary relative sea level changes on the Imbituba-Laguna coast (Southern Brazil). *Marine Geology*. 237, 143–168.

- GONÇALVES, R.A.; LEHUGEUR, L.G.O.; CASTRO, J.W.A.; PEDROTO, A.E.S. 2003. Classificação das feições eólicas dos Lençóis Maranhenses-Maranhão-Brasil. Fortaleza: UFC. Mercator. n.3, p.99-112.
- GUEDES, C.C.F. 2012. Cronologia e sedimentologia dos depósitos eólicos quaternários da costa leste maranhense. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 215p.
- GUEDES, C.C.F.; GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; DE WITT, R.; AGUIAR, V.A.P. 2017. Weakening of northeast trade winds during the Heinrich stadial 1 event recorded by dune field stabilization in tropical Brazil. *Quaternary Research*. Cambridge University Press. p. 1-13.
- GUEDES, C.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; GIANNINI, P.C.F.; DeWITT, R.; AGUIAR, V.A.P. 2013. Luminescence characteristics of quartz from Brazilian sediments and constraints for OSL dating. *Brazilian Academy*. 1303-1316.
- HESP, P.A. 1983. Morphodynamics of incipient foredunes in New South Wales, Austrália. In: BROOKFIELD, M.E. & AHLBRANDT, T.S. eds. *Eolian Sediments and Processes*. Amsterdam, Elsevier, p. 325-342.
- HILBERT, N.N.; GUEDES, C.C.F.; GIANNINI, P.C.F. 2015. Morphologic and sedimentologic patterns of active aeolian dune-fields on the east coast of Maranhão, northeast Brazil. *Earth Surface Process and Landforms*. 11.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1992. Atlas Nacional do Brasil. Rio de Janeiro.
- JIMENEZ, J.A.; MAIA, L.P.; SERRA, J.; MORAIS, J.O. 1999. Aeolian dune migration along the Ceará coast, North-Eastern Brazil. *Sedimentology*, 46: 689-701.
- JOHNSON, M. 2016. Applications of self-organizing maps. Second edition. 298p.
- KOCUREK, G.; EWING, R.C. 2005. Aeolian dune field self-organization - implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. *Geomorphology*. 72, 94– 105.
- KOCUREK, G.; EWING, R.C.; MOHRIG, D. 2010. How do bedform pattern arise? New views on the role of bedform interactions within a set of boundary conditions. *Earth surface processes and landforms*. 35, 51-63.
- KOCUREK, G.; HAVHOLM, K.G. 1993. Eolian Sequence Stratigraphy - a conceptual framework. In: *Siliciclastic Sequence Stratigraphy*, American Association Petroleum Geologists. 58. p.393-409.

- KOHONEN, T. 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 43:59-69.
- KOHONEN, T. 2001. *Self-Organizing Maps*. Third Extended Edition, Springer Series, Information Sciences, 30, 501p.
- LANCASTER, N. 1995. *Geomorphology of desert dunes*. London, Routledge, 312p.
- LEES, B. 2006. Timing and formation of coastal dunes in northern and eastern Australia. *Journal of Coastal Research*, 22(1):78-89.
- LEVIN, N.; TSOAR, H.; MAIA, L.P.; CLAUDINO-SALES, V.; HERMANN, H. 2008. Lagoas costeiras interdunares e branqueamento de dunas no nordeste brasileiro. *Mercator, Fortaleza*, v. 7, n. 14, p. 143-166.
- LUNA, M.C.M.M.; PARTELI, E.J.R.; HERRMANN, H.J. 2012. Model for a dune field with an exposed water table. *Geomorphology*. 169–177.
- MAINGUET, M.; & CHEMIN, M.C. 1983. Sand seas of the Sahara and Sahel: an explanation of their thickness and sand dune type by the sand budget principle. In: BROOKFIELD, M.E.; & AHLBRANDT, T.S. *Eolian sediments and processes*. Elsevier, Amsterdam, 38, 660 p.
- MARTINÉZ, M.L.; PSUTY, N.P.; LUBKE, R.A. 2004. A Perspective on Coastal Dunes. In: MARTINÉZ, M.L. PSUTY, N.P. *Coastal dunes - ecology and conservation*. Springer. Vol 171. 26-33.
- MARTINHO, C.T. 2008. *Morfodinâmica e evolução de campos de dunas transgressivos quaternários do litoral do Rio Grande do Sul*. Tese de doutoramento. Instituto de geociências. Universidade Federal Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 215p.
- MARTINHO, C.T.; DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. 2008. Mid to late Holocene evolution of transgressive dunefields from Rio Grande do Sul coast, southern Brazil. *Marine Geology*. 256, 49–64.
- MARTINHO, C.T.; GIANNINI, P.C.F.; SAWAKUCHI, A.O.; HESP, P.A. 2006. Morphological and depositional facies of transgressive dunefields in the Imbituba-Jaguaruna region, Santa Catarina State, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*. 673-677p.
- McFARLAN, Jr.E. (1961). Radiocarbon dating of late Quaternary deposits, south Louisiana. *Geological Society of America Bulletin*, v.72, p.129-158.

- McKEE, E.D. 1979. A study of global sand seas. U.S. Geological Survey, Professional papers, 1052: 423p.
- MELO, A.B.C.; CAVALCANTI, I.F.A.; SOUZA, P.P. 2009. Zona de convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I.F.A. *et al.* (Eds). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 25-39.
- MELTON, F.A. 1940. A tentative classification of sand dunes its application to dune history in the Southern high plains. *Journal of Geology*. 48(2):113-145.
- MENDES, V.R.; GIANNINI, P.C.F.; GUEDES, C.C.F.; DEWITT, R.; ANDRADE, H.A.A. 2015. Central Santa Catarina coastal dunefields chronology and their relation to relative sea level and climatic changes. *Brazilian Journal of Geology*, 45:79-95.
- MESQUITA, N.R. 2002. Classificação de defeitos em tubos de gerador de vapor de plantas nucleares utilizando mapas auto – organizáveis. Tese de doutoramento. Escola politécnica de engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MMA/IBAMA. 2003. Plano de Manejo do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. São Luís, 499p.
- NIMER, E. 1989. Climatologia do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil.
- PARTELI, E.J.R.; SCHWÄMMLE, V.; HERRMANN, H.J.; MONTEIRO, L.H.U.; MAIA, L.P. 2006. Profile measurement and simulation of a transverse dune field in the Lencois Maranhenses. *Geomorphology* 81, 29-42.
- PINTO, M.W. 2015. Evolução morfodinâmica em escala histórica do campo de dunas do santinho-ingleses no norte da ilha de Santa Catarina. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 169p.
- PYE, K. 1980. Geomorphic evolution of coastal sand dunes in a humid tropical environment: North Queensland. PhD Thesis, Universidade de Cambridge.
- PYE, K. 1983. Formation and history of Queensland coastal dunes. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd 45*: 175-204.
- PYE, K.; & TSOAR, H. 1990. Aeolian sand and sand dunes. London, Unwin, 396p.
- ROY, P.S.; COWELL, P.J.; FERLAND, M.A.; THOM, B.G. 1994. Wave-dominated coasts. In: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D. (Ed.). *Coastal Evolution, Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press. p.121-186.

- SANTOS, J.H.S. 2008. Lençóis Maranhenses atuais e pretéritos: um tratamento espacial. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 250p.
- SAWAKUCHI, A.O. 2006. Morfometria e simulação numérica de campos de dunas costeiras: estudo baseado em exemplos brasileiros. Tese de doutoramento. Instituto de geociências. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar. Universidade de São Paulo. 319p.
- SAWAKUCHI, A.O.; GIANNINI, P.C.F.; MARTINHO, C.T. 2003. Episódios de deposição eólica quaternária no litoral centro-sul de Santa Catarina: correlação com variações do nível relativo do mar baseada em idades TL e LOE. In: *Congresso da associação brasileira de estudos do Quaternário*, 9, Recife, PE. Anais... meio digital (CD), Recife, ABEQUA.
- SCHOFIELD, J.C. 1975. Sea-level fluctuations cause periodic, postglacial progradation, south Kaipara barrier, north Island, New Zealand. *Journal of Geology and Geophysics*, 18: 295-316.
- SEMENIUK, V.; CRESWELL, L.D.; WURM, P.A.S. 1989. The Quindalup dunes: the regional system, physical framework and vegetation habitats. *Journal of the Royal Society of western Australia*. 71: 23-47.
- SILVA, M.S.; HESP, P.A. 2013. Increasing rainfall, decreasing winds, and historical changes in Santa Catarina dunefields, southern Brazil. *Earth Surface Process and Landforms*. 38. 1036-1045.
- SILVEIRA, L.F.; KLEIN, A.H.F.; TESSLER, M.G. 2010. Classificação morfodinâmica das praias do estado de Santa Catarina e do litoral do norte do estado de São Paulo utilizando sensoriamento remoto. *Brazilian journal aquatic science technology*. 15(2): 13-26.
- SILVERMAN, B.W. 1986. Density estimation for statistics and data analysis. New York: Chapman and Hall. 170p.
- TOMAZELLI, L.J.; DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C. 2008. Geomorfologia e potencial de preservação dos campos de dunas transgressivos de cidreira e Itapeva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Pesquisas em Geociências*, 35(2): 47-55.

- TSOAR, H. 2004. Sand dunes. In: HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C.; POWLSON, D.; SCOW, K.; SINGER, M.; SPARKS, D. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. (3ª edição). Elsevier, Oxford, p. 462-471.
- TSOAR, H. 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A*. 357, 50–56.
- TSOAR, H.; LEVIN, N.; PORAT, N.; MAIA, L.P.; HERRMANN, H.J.; TATUMI, S.H.; CLAUDINO-SALES, V., 2009. The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quaternary Research* 71, 217-226.
- VALERIANO, M.M.; ALBUQUERQUE, P.C.G. 2010. Topodata: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais. 79p.
- WASSON, R.J.; HYDE, R. 1983. Factors determining desert dune type. *Nature*, 304: 337-339.
- WATSON, D.F., & PHILIP, G.M. 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing*, 2:315–327.
- WERNER, B.T. 1995. Eolian dunes: computer simulations and attractor interpretation. *Geology*. v. 23; n.12; p. 1107–1110.
- WILKINS, I.G.; FORD, R.L. 2007. Nearest neighbour methods applied to dune field organization: the Coral Pink sand dunes, Kane Country, Utah, USA. *Geomorphology*, 83: 48-57.
- YIZHAQ, H.; ASHKENAZY, Y.; TSOAR, H. 2008. Sand dune dynamics and climate change: a modeling approach. *Journal of Geophysical Research*, Washington. 114p.