

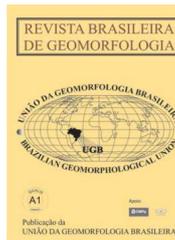


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 18, n° 1 (2017)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i1.973>



INSTABILIDADE COSTEIRA EM UM LITORAL EM ESPIRAL: O EXEMPLO DA PRAIA DA LAGOINHA, ESTADO DO CEARÁ

COASTAL INSTABILITY IN A COAST WITH SPIRAL GEOMETRY: THE EXAMPLE OF LAGOINHA BEACH, CEARÁ STATE, NORTHEASTERN BRAZIL

Alexandre Medeiros de Carvalho

*Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará
Av. da Abolição, 3207, Fortaleza, Ceará, CEP: 60.165-081, Brasil
Email: medeiros@ufc.br*

Vanda de Claudino-Sales

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici, 900, Fortaleza, Ceará, CEP: 60.455-760, Brasil
Email: vcs@ufc.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
26/10/2016
Aceito (Accepted):
12/02/2017

Palavras-chave:

Dinâmica Costeira; Sistema Praia-Ponta Litorânea-Duna; Litoral em Espiral; Potencial de Formação de Dunas; Deriva Litorânea.

Keywords:

Coastal Dynamics; Beach-Headland-Dune System; Spiral-Like Coast; Potential Of Dune Formation; Litoral Drift.

Resumo:

Atividades hidrodinâmicas, eólicas e antropogênicas em uma área costeira com geometria em forma de espiral foram tratadas sob o mesmo grau de importância quanto à influência que podem exercer sobre o desenvolvimento e a estabilização da linha de costa. A área de estudo foi a praia Ponta da Lagoinha, localizada no segmento noroeste da zona costeira do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. A metodologia empregada teve como enfoque principal a interação entre a ação dos ventos e das ondas, baseada na determinação do potencial de formação de dunas e na intensidade da deriva litorânea para diferentes trechos da linha de costa. Os valores calculados para esses elementos definem a existência de uma tênue relação de compensação no transporte/deposição de sedimentos na área de estudo, produzida pela atuação conjunta dos processos eólico e hidrodinâmico marinho, criando um sistema do tipo praia-ponta litorânea-duna. Essa relação, devido ao caráter de equilíbrio dinâmico existente na área, apresenta elevada sensibilidade em relação à interferência humana. Esse aspecto ficou bem evidenciado nos efeitos provocados pela fixação artificial de dunas e ocupação da faixa de bypass eólico ao longo do promontório da Lagoinha.

Abstract:

Hydrodynamic, aeolian and anthropogenic activities in a coastal area with spiral geometry were treated as having the same importance, considering the influence they can exert on the stabilization of the beach. The studied area is the beach-headland of Lagoinha, located in the northwest segment of the coast of Ceará State, Northeast Brazil. The methodology employed had as primary focus the interaction

between the action of winds and waves, based on determining the potential of dune formation and the intensity of longshore current for different portions of the coastline. The calculated values define a tenuous relationship between these agents, creating a beach-headland-dune system, where compensation of sediment transportation and deposition is present. This relationship, due to the dynamic equilibrium of the coastline, highlights the sensitivity of the environment to human interference. This aspect is well evidenced by the effects of development and artificial fixation of sand dunes on the aeolian bypass section along the Lagoinha headland.

1. Introdução

Litorais com geometria em forma de espiral ou do tipo *headland-bay beach*, segundo definido por Yasso (1965), são caracterizados por uma faixa de praia posicionada a sotamar de uma ponta litorânea submetida a uma direção predominante de ataque das ondas. Sua característica principal é o desenvolvimento de uma forma plana côncava voltada para o mar, resultante dos

processos de erosão causados pela refração, difração e reflexão de ondas dentro da zona de sombra a sotamar do promontório. Essa definição, reformulada por Hsu *et al.* (1993), acrescenta que no modelado em espiral a geometria curvilínea imediatamente a sotamar do promontório diminui gradualmente em curvatura em direção ao promontório seguinte. Esse intervalo, formado pelo embaixamento entre essas duas feições, define, então, os limites da espiral (Figura 1).

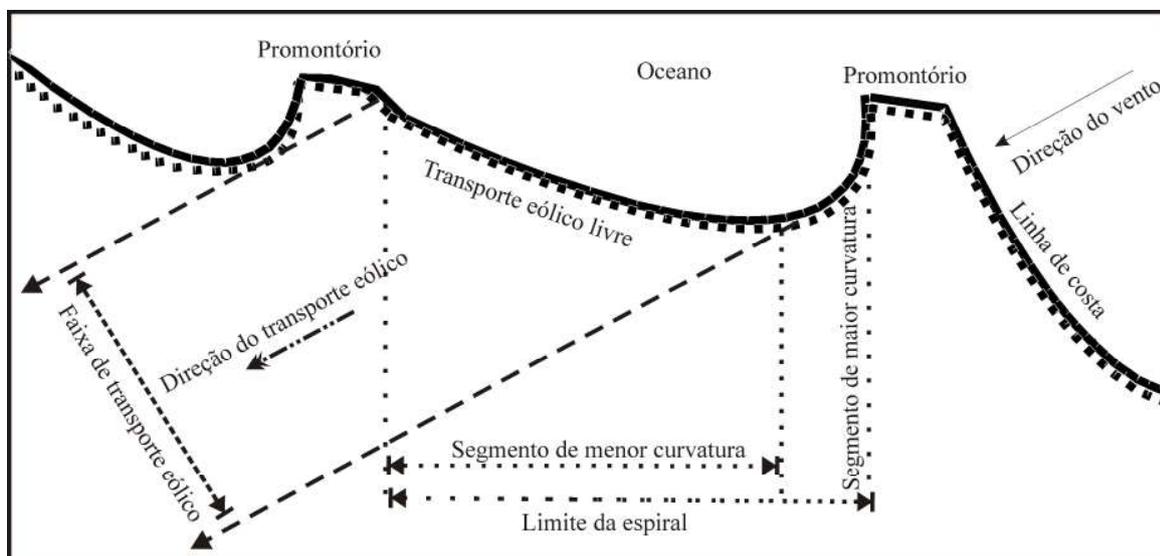


Figura 1 - Litoral com geometria em espiral na costa noroeste do Estado do Ceará.

Tal tipo de linha de costa, que representa um sistema costeiro formado pela inter-relação dinâmica entre praias, ponta litorânea e dunas, costuma evoluir ao longo do tempo, com uma forma que pode ser interpretada como estável do ponto de vista da adaptação às condições de incidência das ondas e dos ventos, interagindo dinamicamente com os mesmos. No entanto, qualquer alteração mais intensa na dinâmica litorânea pode significar desequilíbrio no sistema interativo praia-ponta litorânea-duna, o que transforma esse tipo de litoral em um sistema costeiro frágil.

A costa cearense, na sua maior parte, é representada por esse tipo de modelado costeiro em forma de

espiral, o qual, segundo Carvalho (2003), é mantido por um processo de equilíbrio dinâmico, no conceito de Silvester (1970) e Hsu *et al.* (1993). Interação nesse processo a configuração da linha de costa, a condição de ventos unidirecionais, a ação das ondas e a disponibilidade de sedimentos (CARVALHO, 2003; Carvalho *et al.* 2016). A ocupação dessa faixa costeira de forma não planejada, seja para o lazer, seja para moradia, tem sido especialmente acentuada pela especulação imobiliária recente. Isso tem exposto a riscos esse sistema costeiro frágil, produzindo desequilíbrios que se expressam principalmente sob a forma de erosão na faixa de praia.

O litoral de Lagoinha, situada no segmento NW

da zona costeira cearense, representa uma região praiana detentora de forte atrativo turístico, por dispor de beleza cênica ímpar, resultante da presença de uma ponta litorânea, modelada pela ação marinha e eólica ao longo da evolução geológica/geomorfológica da área. Nas últimas décadas esse segmento litorâneo tem experimentado uma agressiva pressão exercida pela especulação imobiliária, o que tem produzido graves problemas ambientais. O exemplo mais expressivo do processo de ocupação é a urbanização da faixa de

entorno da “Ponta da Lagoinha”, cartão postal de fama internacional cujas características cênicas naturais têm experimentado forte degradação (Figura 2).

Sob a motivação e a perspectiva de avaliar as interferências no equilíbrio dinâmico de um litoral em forma de espiral, este trabalho aborda (1) a dinâmica natural da Praia da Lagoinha, com enfoque nas atividades marinho-costeira e eólica no sistema praia-ponta-dunas, e (2) analisa as variáveis relativas à interferência da ação antropogênica na dinâmica natural da área.



Figura 2 - Imagem do Sistema Praia-Ponta Litorânea-Dunas “Praia da Lagoinha”, de grande potencial paisagístico.

2. Caracterização da Área de Estudo

A costa NW do Ceará, situada na porção setentrional da margem continental passiva transformante do Nordeste brasileiro, ocupa uma extensão de cerca de 350 km. Sua linha de costa é formada por uma sequência de promontórios que separam embaiamentos de 10 a 30 km de extensão, cuja fisiografia litorânea pode ser enquadrada, com algumas modificações, no modelo de *crenulate-shaped bays* de Silvester (1960 e 1970), Silvester & Ho (1972), e Hsu *et al.* (1989), de *headland-bay beach* de Yasso (1965), ou de litoral zetaforme de Bird (2000) (Figura 1). A geologia é caracterizada por um empilhamento estratigráfico composto por raros

afloramentos de rochas metamórficas pré-cambrianas, sendo a cobertura sedimentar constituída pelos depósitos terciário-quadernários da Formação Barreiras, além de depósitos colúvio-eluviais e unidades quadernárias, estas representadas principalmente por depósitos eólicos e praias (PINHEIRO *et al.* 2016).

A região estudada está localizada a 120 km a NW de Fortaleza, Capital do Estado e maior cidade litorânea do Nordeste setentrional, compreendendo uma faixa litorânea com cerca de 16.000m de extensão. Para efeito deste estudo, o segmento em tela foi dividido em sete diferentes compartimentos, levando em conta a orientação principal da linha de costa (Figura 3).

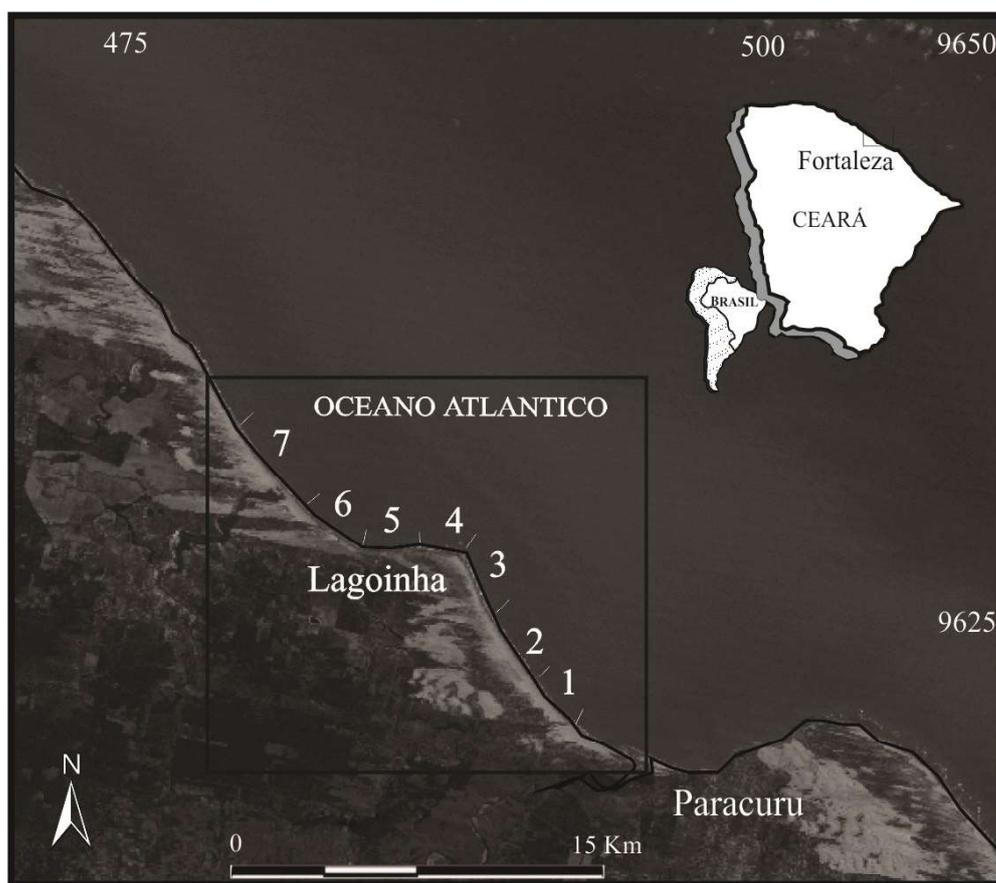


Figura 3 - Localização da área de estudo, com discriminação dos trechos costeiros pesquisados.

Do ponto de vista natural, a geomorfologia da área compreende faixas de praias planas e amplas dos tipos dissipativas e intermediárias, que se interligam a dunas frontais ou a terraços eólicos do tipo lençol de areia. As praias se situam a barlar e a sotamar da Ponta da Lagoinha, a qual foi elaborada em fácies conglomerática da Formação Barreiras. Ao longo da ponta litorânea ocorrem plataformas de abrasão e falésias capeadas por depósitos eólicos do tipo paleodunas, dunas de gerações menos antigas e/ou dunas móveis recentes.

As falésias mais altas formam paredes que atingem mais de trinta metros de altura. São caracterizadas como falésias mortas desconectadas do mar, apresentando-se recobertas por pacotes dunares. Posicionam-se à retaguarda da faixa de falésias vivas, as quais apresentam altimetria não superior a 4 m.

Os depósitos eólicos se estendem por toda a extensão da área de estudo, sendo formados por areias finas a médias, bem moderadamente selecionadas, com cores que variam no intervalo de branca a avermelhada. As dunas exibem portes variados e têm sido agrupadas em distintas gerações por Carvalho (1990); Maia (1993);

Carvalho (1994); Maia (1998); Claudino-Sales (2002); e Carvalho (2003), entre outros. Um elemento importante da dinâmica eólica local é o sistema de *bypass* ou transpasse de sedimentos através de ponta litorânea, no sentido barlar para sotamar do promontório (e.g. PINHEIRO, 2015; CLAUDINO-SALES e CARVALHO, 2014; CASTRO, 2005, 2004), realizado através de dunas móveis que se apresentam como sendo do tipo *headland bypass dunefield*, tal qual descrito por Tinley (1985) (Figura 4.)

As condições de clima, ventos e ondas na região mantêm uma estreita relação com o processo de deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), segundo demonstrado por CLIVAR/BRASIL (1998). A ZCIT atua no controle de um forte ciclo estacional, com periodicidade anual associada às estações climáticas. Ela se desloca para o hemisfério norte durante o inverno/primavera austral (entre agosto e outubro), e para o hemisfério sul durante o verão/outono austral (março a abril), quando é responsável pela definição da estação chuvosa no Nordeste brasileiro. A ZCIT é marcada pela convergência dos ventos alísios de Nordeste e de Sudeste.

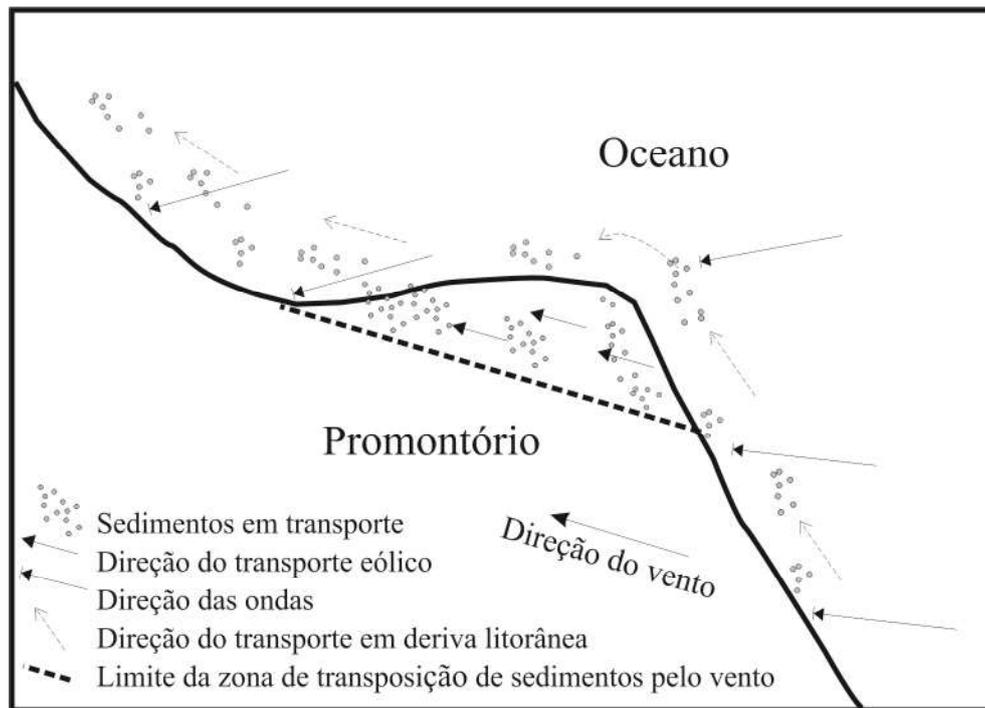


Figura 4 - Ilustração do sistema de bypass eólico em Lagoinha.

Assim, durante os meses de dezembro a abril, quando a ZCIT se desloca no sentido meridional e produz a estação de chuvas na região, verifica-se a penetração dos alísios de NE na zona costeira. De julho a novembro, a ZCIT se desloca para o Norte, afastando-se do equador, quando as chuvas começam a diminuir, até caracterizar-se o período de estiagem. Nesse período, os alísios de SE/E se tornam mais efetivos, aumentando significativamente sua predominância em relação aos de NE. Dessa forma, ao longo do ano os principais ventos responsáveis pelo transporte sedimentar são os alísios de ESE, que são os mais intensos, seguidos pelos de E e ENE. As velocidades variam de 3,40m/s a 9,57m/s, sendo a média de 6,79m/s (CARVALHO, 2003).

As ondas locais, observadas de julho a novembro de 1997, são do tipo “sea”, com período de 1 a 9s, correspondendo a cerca de 72% das ocorrências, e “swell”, com período a partir de 10s, correspondendo a cerca de 28%. Em torno de 60,6% das ondas apresentaram direção entre 46 e 120°AZ, e as alturas significativas mais comuns (85%) variaram de 1,0 a 1,7m, enquanto as ondas com alturas significativas de 2,0 a 2,4m representaram 1,2%. O regime de marés pode ser caracterizado como mesomarés, com periodicidade semidiurna e altura de marés que chegaram a mais de 3,26m no ano de 1996 (CARVALHO, 2003).

A atividade econômica da região é baseada no comércio, agricultura e pecuária de subsistência, além da cultura do caju. O turismo vem, no entanto, sendo crescente ao longo das últimas décadas, representando hoje a mais importante ocupação econômica. A relativa proximidade da Praia de Lagoinha com a cidade de Fortaleza intensifica os fluxos turísticos nacionais e internacionais, assim como o desenvolvimento de uma série de atividades voltadas para o lazer e a recreação local.

Um dos impactos desse crescimento turístico e econômico tem sido a ocupação de campos de dunas e da faixa litorânea, sobretudo voltada para a instalação de residências de veraneio e agricultura. As construções e ocupações agrícolas vêm sendo instaladas sobretudo no percurso da migração de dunas de *bypass*. Com frequência, as areias das dunas têm sido fixadas por diversos tipos de vegetação.

3. Metodologia

O mapeamento da área estudada teve como base o processamento digital, a partir da interpretação de fotografias aéreas de 1958, de imagens Landsat-7 ETM de 2000 e quickbird de 2004, visando ao estabelecimento dos limites de migração dos campos de dunas, às modificações ocorridas na configuração da linha de costa

e à cronologia de ocupação da área.

O volume de sedimentos transportados pelo vento foi determinado através do uso de armadilhas cilíndricas desenvolvidas por Maia (1998), que se baseou no modelo de Leatherman (1978). A parametrização do transporte eólico foi realizada com medidas *in loco* de

volume de sedimentos transportados utilizando-se as armadilhas de velocidades e direções do vento usando um anemômetro portátil da DAVIS instruments, modelo Weather Wizard III. A aquisição desses dados foi feita concomitantemente à captura dos sedimentos (Figuras 5 e 6).

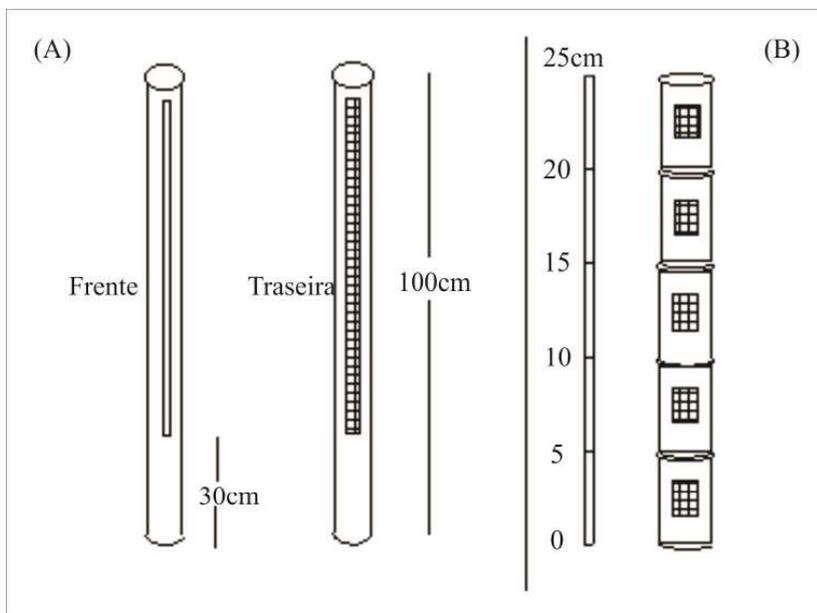


Figura 5 - Armadilhas para sedimentos eólicos. A) do tipo integrado e B) do tipo discretizante por altura de transporte.



Figura 6 - Anemômetro para a medição de dados de vento, posicionado na margem inferior esquerda e centro da fotografia e armadilhas para sedimento eólico posicionadas à direita, na metade superior da foto. As armadilhas foram colocadas em uma duna de 15 m de altura e estão com aberturas perpendiculares à direção do vento.

Os dados obtidos nessas incursões foram tratados estatisticamente a partir de um processo de regressão não linear, utilizando-se as séries de dados de transporte eólico medidos concomitantemente às velocidades de vento. Com o processo de correlação entre esses dados gerou-se a equação (1), que representa o potencial de transporte eólico para a região. Assim, (1) $q_t = 0,0019(U_{1m})^{2,255}$, sendo U_{1m} o valor da velocidade do vento medido a um metro de altura em relação à superfície do terreno.

Para os cálculos dos volumes de sedimentos transportados durante o período de um ano foram utilizadas 6.000 medições de ventos (velocidade média e direção) em intervalo de uma hora ao longo do ano de 2002, em uma estação fixa situada na localidade de Pecém, distante cerca de 50 km da Praia da Lagoinha. Como esses dados foram medidos a 10m de altura em relação à superfície do terreno, a equação (1) sofreu uma adequação para comportar as diferenças de velocidades resultantes das alturas de medição. O valor de 1,22m/s, calculado pela comparação entre os dados de vento medidos concomitantemente a 1m e 10m altura, corresponde à média de sobrevelocidade resultante da elevação da altura de medição. Essa média foi aplicada à equação (1), resultando no seguinte formato: (2) $q_t = 0,0019(U_{10m}/1,22)^{2,255}$, onde U_{10m} é a velocidade do vento a dez metros de altura em relação à superfície do terreno.

Para determinar o *Potencial de Formação de Dunas (PDF)*, que representa a capacidade do vento de formar dunas em determinado setor da costa, divi-

diu-se a área estudada em sete trechos (Figura 3), cuja extensão individual foi definida através da ocorrência de segmentos retilíneos.

Para cada um desses trechos foram medidos os azimutes da direção do vento efetivo e da linha de costa. A relação entre os ângulos é dada pelo $\sin \alpha$, onde $\alpha = \phi - \beta$, sendo que ϕ é o azimute da linha de costa e β é a direção predominante dos ventos ou do vetor resultante desses ventos. Assim, (3) $PDF = qt.\sin \alpha$ (Carvalho, 2003). Esta equação dimensiona uma correlação do transporte eólico com base na relação entre o azimute da posição da linha de costa e a direção do ângulo de incidência dos ventos efetivos para cada trecho (Figura 7).

A direção dos ventos efetivos pode ser medida de duas formas: através do cálculo do vetor resultante entre as principais direções do vento, ou extraída do eixo de migração das dunas em imagens de satélite. Em ambos os casos os valores resultantes são idênticos. Optou-se, no entanto, pelas medidas extraídas de imagem de satélite por serem de mais fácil aquisição. O vetor da direção de transporte eólico medido para a área estudada foi avaliado em 94° AZ.

Os trechos onde o PDF se apresenta nulo ou com valor negativo representam, respectivamente, aqueles onde os ventos não retiram sedimentos da face de praia, e aqueles onde o transporte eólico ocorre no sentido do continente para a praia, os trechos característicos de ocorrência de *bypass*. Aqueles com valores positivos correspondem aos trechos onde o vento é efetivo na retirada de sedimentos da praia, realizando seu transporte em direção ao interior do continente, assim formando dunas.

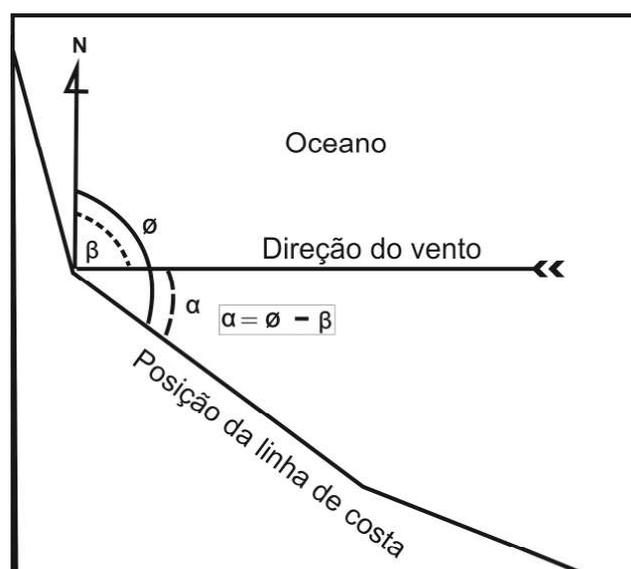


Figura 7 - Ângulos de orientação da linha de costa e da direção do vento.

Os estudos da hidrodinâmica foram baseados na determinação da Intensidade da Deriva Litorânea (ID), segundo método desenvolvido no Coastal Engineering Research Center (CERC, 1984), que tem como base a definição do ângulo de aproximação e a altura das ondas na zona de arrebentação. Nesse contexto, considera-se que a intensidade da deriva, segundo Komar (1976 e 1998), está relacionada ao ângulo de incidência das ondas, segundo a expressão: $Y = \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha$, onde α é o ângulo que a frente de onda faz com a linha de costa. Em função de seus padrões de convergência e divergência as ondas apresentam diferentes alturas ao longo da costa.

Segundo esse conceito, a ID por unidade de área da antepraia foi calculada utilizando a expressão: $X = Y \cdot H^2$ (número adimensional), onde H é a altura da onda estimada ao longo da costa (Bittencourt *et al.*, 2003). As alturas das ondas ao longo da linha de costa (H) foram definidas com base no coeficiente de refração (K), obtido diretamente dos diagramas de refração: $K = (b_0/b)^{1/2}$ e $H = H_0K$, onde (b_0) é a distância entre dois

raios de ondas adjacentes ou ortogonais às frentes de onda, em condições de águas profundas e (b) a mesma distância medida em águas rasas, (H_0) é a altura de onda em águas profundas (BASCOM, 1954).

Para os cálculos de ID foi utilizada a direção principal dos trechos do litoral. Uma vez que a faixa litorânea estudada é relativamente longa, foi necessário segmentar a linha de costa em intervalos que pudessem ser representados por linhas retas, resultando, como salientado, na individualização dos sete trechos indicados na Figura 3.

Para cada trecho, diretamente nos diagramas de refração foram medidos os ângulos que os raios de ondas incidentes formaram com a linha de costa e demais parâmetros usados nos cálculos da ID. A percentagem de incidência anual das ondas foi calculada a partir das estatísticas de onda publicadas por Hogben & Lumb (1967), cujas direções principais podem ser correlacionáveis às médias das direções dos ventos, uma vez que na região dominam ondas do tipo “sea”, que são geradas localmente (Figura 8).

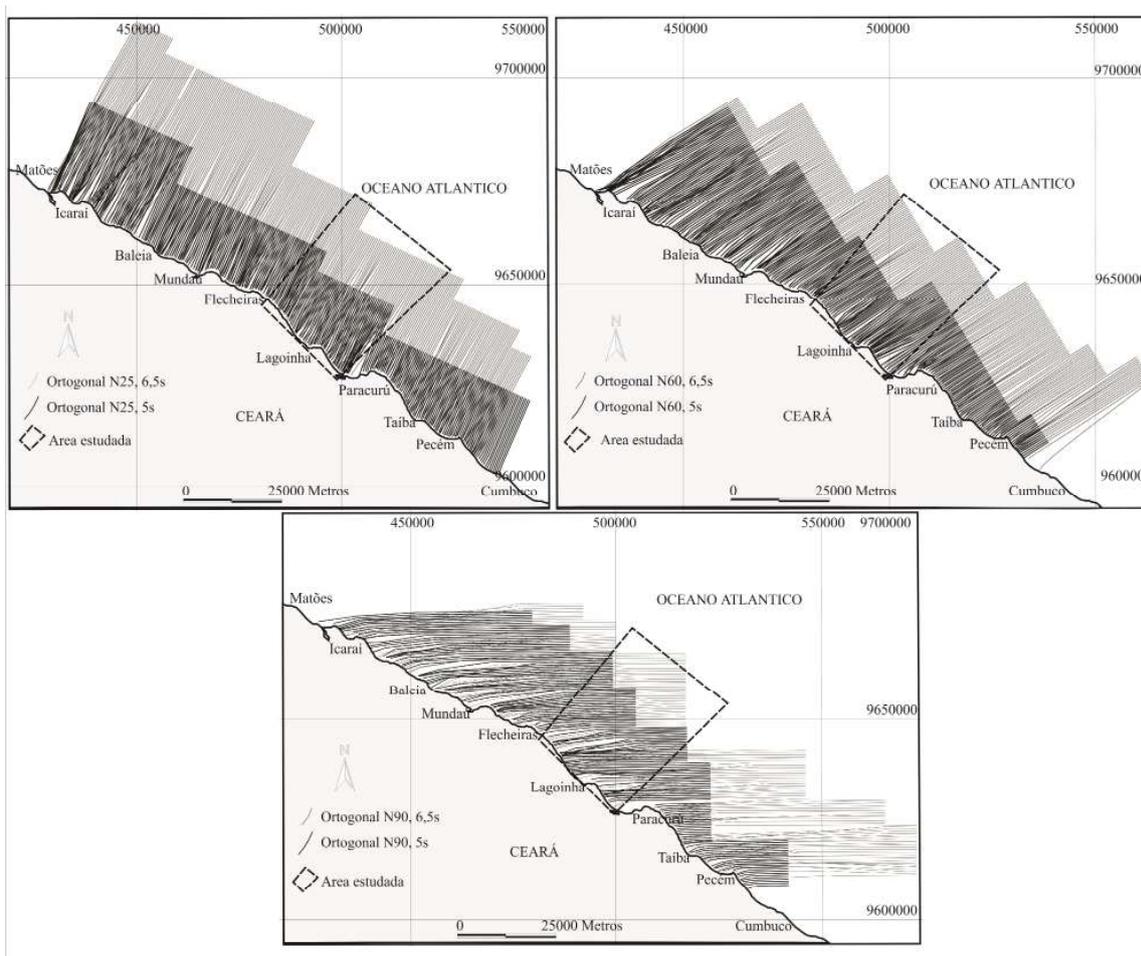


Figura 8 - Diagramas de refração usados para os cálculos da Intensidade da Deriva Litorânea (ID).

A ID ponderada foi calculada multiplicando-se a sua intensidade pelo percentual de incidência anual das ondas. A ID efetiva foi calculada subtraindo-se a deriva secundária da deriva dominante. Posteriormente, os valores calculados da intensidade da deriva litorânea para cada trecho de linha de costa foram correlacionados com o PDF para os mesmos trechos.

Para cada trecho estudado da linha de costa foram avaliadas as condições físicas, identificando-se especialmente a presença e o estágio de erosão e a existência ou não de transporte de sedimentos. Tais elementos foram comparados em diferentes épocas através de fotografias e imagens de satélite. Também foram avaliadas as intervenções antropogênicas e suas relações com os aspectos definidos em sensoriamento remoto.

Os resultados obtidos pela correlação entre PDF e ID foram confrontados com a evolução geomorfológica experimentada pela área durante os últimos anos. A partir disso foram avaliadas a influência e/ou contribuição de cada processo no resultado final, considerando-se também a participação antropogênica nos contextos geral e específico.

4. Resultados e Discussões

Os dados indicam que o PDF é crescente entre os trechos costeiros 1, 2 e 3, mas sofre uma acentuada redução nos trechos 4 e 5, sendo negativo neste último. Verifica-se, no entanto, um retorno ao crescimento nos trechos 6 e 7 (Tabela 1). Tal situação tem como significado a retirada de sedimentos da praia pelo vento, que os transporta em direção ao interior do continente nos trechos positivos. No caso do trecho em que o PDF é negativo, considera-se que não há transporte de sedimentos em direção ao interior do continente para formar

dunas, mas ocorre, ao contrário, deposição na faixa de praia (Figura 9).

Quanto à ID, verifica-se que ela é crescente do trecho 1 para o 2, e negativa no 3. Volta a ser elevada no trecho 4, e sofre declínio, embora num patamar positivo, nos trechos 5 e 6, passando a experimentar uma forte elevação ao longo do trecho 7 (ver Tabela 1 e Figura 9).

A análise desse conjunto de situações indica o seguinte contexto:

O volume estimado de sedimentos transportados dos trechos 1 e 2 em direção ao interior é da ordem de 1.666m³/m/ano. Por outro lado, a soma da intensidade de deriva litorânea é de 1.326 (valor adimensional). Tal fato implica a maior formação de dunas costeiras, mas por outro lado também significa déficit de sedimentos na faixa de praia, o que pode gerar instabilidade e erosão no perfil litorâneo.

No trecho 3, o PDF indica um predomínio de condições favoráveis à retirada de sedimentos da faixa de praia pela ação do vento, mas a baixa intensidade da deriva litorânea pode significar a existência de condições de equilíbrio dinâmico nesse trecho. Neste caso, a retirada de areia da praia pelo vento pode ser compensada no todo ou em parte pela deposição promovida na faixa de praia pela baixa intensidade da deriva. Nestes termos, há formação de dunas costeiras, mas sem prejuízo do equilíbrio da faixa de praia.

Nesse trecho 3, em adição, salienta-se que cerca de 1/3 de sua área contribui para alimentar, através de *bypass* eólico, os trechos 4 e 5 (Figuras 3 e 9). Considerando-se que o PDF nesse trecho 3 é da ordem de 1.389m³/m/ano, o *bypass* implica o transporte de cerca de 463m³/ano de sedimentos (1/3 do total) em direção a sotamar da ponta litorânea.

Tabela 1: Cálculo do Potencial de Formação de Dunas nos trechos estudados.

Trecho da costa	Potencial de formação de dunas (Pdf) em m ³ /m/ano	Intensidade da Deriva Litorânea (ID)
1	591	288
2	1075	1038
Somatório	1666	1326
3	1389	-288
4	54	772
5	-213	292
6	579	147
7	1323	2240

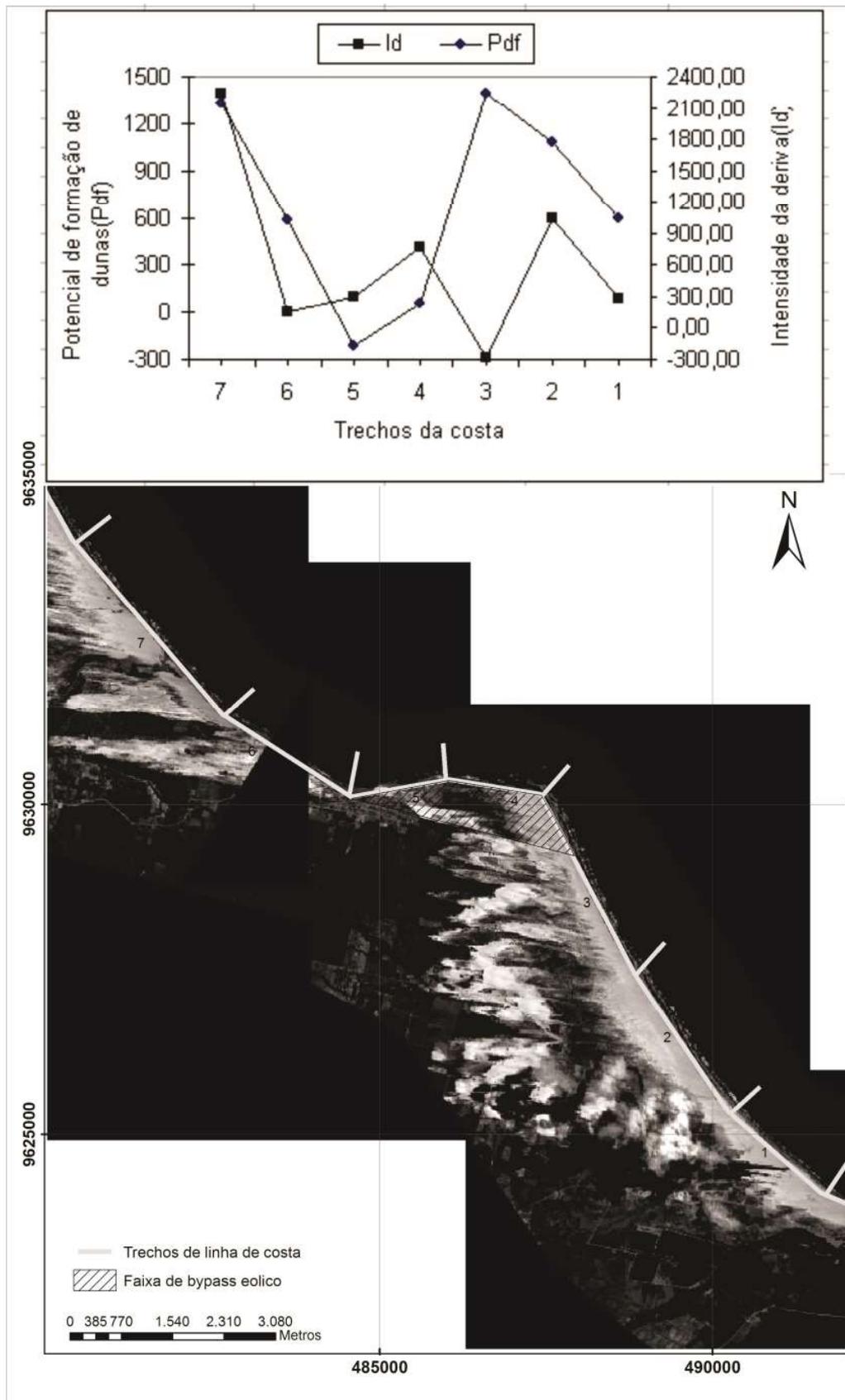


Figura 9 - Correlação entre Intensidade da Deriva Litorânea (ID) e Potencial de Formação de Dunas (PDF) nos trechos da faixa costeira pesquisada. Discriminação da faixa de bypass eólico na Ponta da Lagoinha.

No trecho 4 o vento tem PDF muito baixo ou quase nulo, o que restringe o transporte de areia em direção ao continente. Desta forma há uma tendência de os sedimentos migrarem paralelamente à linha de costa. Mas a exposição à incidência ou ataque direto das ondas tem promovido um processo erosivo, com formação de falésia viva e plataforma de abrasão (Figura 10b). Porém, em direção a oeste, verifica-se haver

permanência de sedimentos no topo das falésias, os quais se acham em processo de fixação por vegetação de mangue. Na verdade, nessa parte ocidental do trecho 4 havia aporte de sedimentos trazido pelo *bypass* eólico oriundo do trecho 3. O *bypass*, no entanto, foi interrompido pela fixação das dunas na zona 3, o que vem aumentando a ação erosiva das ondas (Figuras 10a; 11).



Figura 10 - A: Dunas frontais sofrendo tentativa de fixação por cobertura vegetal psamófila. B: Costões e plataforma de abrasão resultante do ataque direto das ondas. C: continuidade das falésias e costões, com sedimentos acumulando-se no topo das falésias e sofrendo fixação por vegetação de mangue. Na Figura C as fotos foram superpostas para criar o efeito “paisagem”.



Figura 11 - Pequena praia à esquerda da foto, no trecho 3. Observa-se a fixação de dunas e o bloqueio dos sedimentos do *bypass* eólico pela plantação de árvores.

No trecho 5 o PDF mostra que o vento tem potencial para trazer sedimentos do continente para a praia, através das dunas de *bypass*. Esse processo pode localmente promover um certo equilíbrio à dinâmica costeira, devido à compensação que o transporte eólico apresenta em relação ao potencial para gerar erosão apresentado pela deriva, que é elevada nesse trecho. Assim, nos trechos 4 e 5 o *bypass* pode

compensar ou minimizar os efeitos da retirada de sedimentos da faixa de praia promovida pela deriva litorânea, se não houver alterações impostas pelas ações sociais.

Nos trechos seguintes, 6 e 7, tanto o PDF quanto a ID voltam a ter potencial para remover sedimentos da face de praia. Nesse contexto pode haver como resposta a produção de erosão a sotamar (Figuras 12a; 12b).

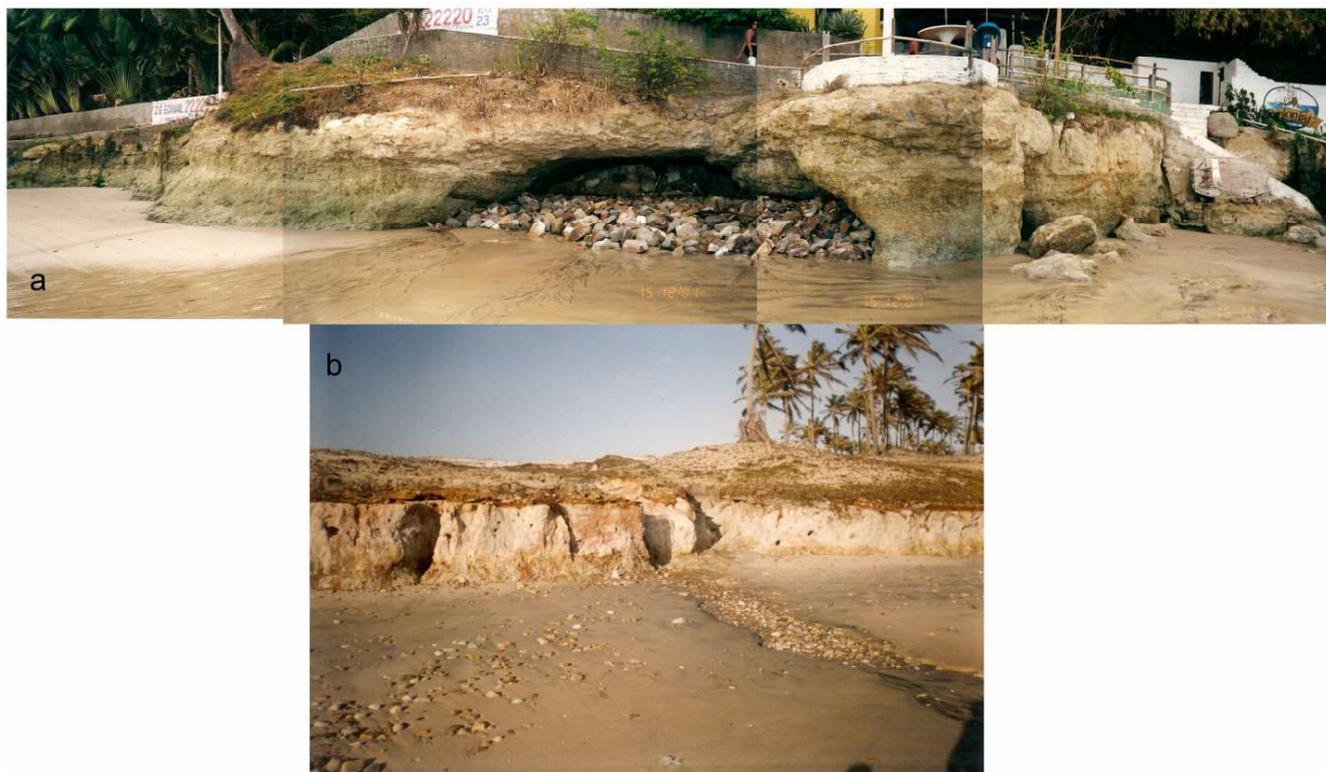


Figura 12 - Processo erosivo em curso sobre falésias vivas no trecho 6 (Figura 12a) e em parte do trecho 7 (Figura 12b). No Figura 12a as fotos foram superpostas para criar o efeito “paisagem”.

4. Conclusões

A intervenção do *bypass* eólico através da Ponta da Lagoinha tem potencial para fornecer considerável quantidade de sedimentos ($463\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$) para os trechos litorâneos situados a sotamar da ponta, de forma a parcialmente compensar a remoção de sedimentos produzido pela deriva litorânea e pelos ventos, quando estes os transportam em direção ao continente. Tal compensação minimiza os processos naturais de erosão costeira nesse litoral em espiral.

No entanto, a maciça plantação de coqueiros e outras culturas, associada à aplicação de técnicas de palhagem ao longo da faixa de *bypass* eólico, têm promovido a fixação da cobertura eólica e a gradativa interrupção do fluxo de sedimentos eólicos nessa faixa.

Consequentemente, essa atividade vem interrompendo o processo natural de *bypass* e, assim, inibe a reposição de sedimentos para os trechos a sotamar da ponta litorânea, ampliando o potencial de erosão da faixa de praia naqueles setores.

Essas situações têm provocado um acentuado déficit de sedimentos nas dunas que recobrem o promontório. Tal fato vem paradoxalmente alterando a paisagem natural e diminuindo o valor cênico da Ponta da Lagoinha, tão caro às atividades de turismo e lazer que justificam a ocupação de da praia homônima (Figura 13).

De forma geral, sob condições naturais, há uma tendência ao desenvolvimento de uma correlação de compensação entre as ações dos processos eólicos e hidrodinâmicos marinhos. Isso favorece o desenvolvimento de uma estabilidade dinâmica onde o acirramento

erosivo a sotamar pode ser compensado ou minorado pelo *bypass* eólico. Na atualidade, no entanto, esse processo está comprometido por atividades sociais, as quais são responsáveis pela instalação de desequilíbrio costeiro e intensificação da erosão.

Em tal contexto, a forma mais adequada de correção ou minoração do processo erosivo passa pela desobstrução da faixa de *bypass*, que corresponde ao trecho mais importante para a manutenção da estabilidade costeira dessa área com morfologia em espiral.



*Figura 13 - Diminuição do volume da duna ativa que capeava a Ponta da Lagoinha no período de 1996 a 2007, no trecho 5 (foto superior e inferior, respectivamente), em função da diminuição no aporte de sedimentos vindo de barlavento através do processo de *bypass*.*

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por financiar esta pesquisa através do Edital Universal.

Referências Bibliográficas

- BASCON, W.J. The control of stream outlets by wave refraction. *Journal of Geology*, vol. 62, p. 600-605, 1954.
- BIRD, E. *Coasts: an Introduction to Coastal Geomorphology*. New York: Wiley and Sons, 2000. 324p.

- BITTENCOURT, A.C.S.P. *et al.* Uma Aproximação de primeira ordem entre o clima de ondas e a localização, de longa duração, de regiões de acumulação flúvio-marinha e de erosão na costa norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 33, p. 159-166, 2003.
- CARVALHO, A.M. **Estudos dos sedimentos cenozóicos da região de Paracuru, Ceará, Brasil**. 1990. 86 f. Monografia (Relatório de Graduação) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 1990.
- CARVALHO, A.M. **Mapeamento geológico, história evolutiva e avaliação ambiental da região de Aquiraz-CE**. 1994. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 1994.
- CARVALHO, A.M.. **Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões-Costa NW do Estado do Ceará. Ênfase nos processos eólicos**. 2003. 188 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2003.
- CARVALHO, A.M.; DOMINGUEZ, J.M.L. Relação entre direção do vento/configuração da linha de costa para o desenvolvimento dos campos de dunas no Ceará. In: **XVIII SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE**. Natal. Resumos.....Natal: Sociedade Brasileira de Geologia. 2000. p.21.
- CARVALHO, A.M. *et al.* Using wind direction and shoreline morphology to model sand dune mobilization. **Journal of Coastal Research**, vol. 32, p.1005-1015, 2016.
- CASTRO, J.W. Transporte eólico de sedimentos e migração de dunas sobre o promontório de Paracuru - litoral setentrional do nordeste brasileiro. **Boletim do Museu Nacional**, vol. 72, p. 1-12, 2004.
- CASTRO, J.W. Buring processes carried out by a mobile transversal dune field, Paracuru county, State of Ceará, Brazil. **Environmental Geology**, vol. 49, p. 214-218, 2005.
- COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER - CERC. **Shore Protection Manual**. Washington: U.S.Army Corps of Engineers, 1984. 2 v.
- CLAUDINO-SALES, V.C. **Les littoraux du Ceará. Géomorphologie de la zone côtière de l'Etat du Ceará: du long terme au court terme**. 2002. 549 f. Tese (Doutorado em Geografia) - UFR de Géographie, Université Paris-Sorbonne, Paris. 2002.
- CLAUDINO-SALES, V. ; CARVALHO, A.M. Dinâmica costeira controlada por promontórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. **Geociências**, vol. 33, p. 579-595, 2014.
- CLIVAR/BRASIL. **Um programa nacional do clima**. São José dos Campos: INPE, 1998, 78p.
- HOGBEN, N.; LUMB, F.E. **Ocean waves statistics**. London: National Physical Laboratory, Ministry of Technology. 1967. 263p.
- HSU, J.R.C; Uda, T.; Silvester, R. Beach downcoast of harbours in bays. **Coastal Engineering**, vol. 19, p.163-181, 1993.
- KOMAR, P.D. **Beach processes and sedimentation**. New-Jersey: Prentice-Hall, 1976, 429p.
- KOMAR, P.D. **Beach processes and sedimentation**. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1998, 544p.
- LEATHERMAN, S.P. A new aeolian trap design. **Sedimentology**, vol. 25, p. 303-306, 1978.
- MAIA, L.P. **Controle tectônico e Evolução Geológica/ Sedimentar da Região da desembocadura do Rio Jaguaribe**. 1993. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 1993.
- MAIA, L.P. **Procesos costeiros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicações para una gestión adecuada de la zona litoral**. 1998. 269 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona. Barcelona. 1998.
- PINHEIRO, L.S.; MORAIS, J.O.; MAIA, L.P. The Beaches of Ceará. In: SHORT, A.D.; KLEIN, A.H.F.(Orgs.). **Brazilian Beach Systems**. Amsterdam: Springer, 2016. p. 175-199.
- PINHEIRO, M.V.A. **Evolução Geoambiental das Dunas de Transpasse do Estado do Ceará**. 340f. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) - Laboratório de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceara. Fortaleza. 2015.
- SILVESTER, R. Growth of crenulate shaped bays to equilibrium. **Journal of Water and Harbor**, vol. 76, p. 275-287, 1970.
- TINLEY, K.F. **Coastal dunes of South Africa**. Pretoria: Foundation for Research Development, South African National Scientific Programs, 1985. 79p.
- YASSO, W.E. Plan geometry of headland-bay beaches. **Journal of Geology**, vol. 73, p. 702-719, 1965.