

O PROCESSO DE SOTERRAMENTO DA CIDADE DE PARACURU - CEARÁ POR DUNAS MÓVEIS TRANSVERSAIS SUBMETIDAS A REGIME DE VENTO UNIMODAL

João Wagner Alencar Castro¹; Ronaldo Antonio Gonçalves².

¹ Departamento de Geologia e Paleontologia / Museu Nacional / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Quinta da Boa Vista, São Cristóvão 20940-040 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: jwalencastro@mn.ufrj.br

² Departamento de Geologia / Instituto de Geociências / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Ilha do Fundão, 21949-900, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: mgoncalves@igeo.ufrj.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de migração de dunas e o conseqüente soterramento da cidade de Paracuru - Ceará por um campo de dunas móveis transversais com cristas orientadas perpendicularmente ao vento dominante. Foram analisados dados de pluviometria, ventos e transporte de sedimento. Os trabalhos envolveram atividades de campo, gabinete e laboratório. Foram identificadas através deste estudo duas direções de transporte de sedimento. A primeira é alimentada pela direção principal dos ventos de leste e a segunda, corresponde a direção secundária dos ventos de sudeste. Foi constatado através da equação proposta por Simons et al que a estimativa total de transporte eólico proveniente dos ventos de leste em direção a Paracuru é de 93,02 m³ / m / ano, enquanto em direção ao mar é de 37,10 m³ / m / ano. Mantidas as condições atuais de ventos e precipitações pluviométricas, a longo prazo, em torno de 120 anos, grande parte da cidade de Paracuru será soterrada.

ABSTRACT

The present work aims the study of dunes migration and consequent burying of the city of Paracuru by a transversal dune field with ridges perpendicular oriented to the dominant wind. Data of pluviometry, wind and aeolian sediment transport were analyzed. Superposition of aerial photographs of different flights have been used as reference and complemented by field monitoring. Two sediment transportation directions were identified. The first one is fed by the main direction of the east winds, and the second corresponds to the secondary direction of the southeast winds. Through the equation proposed by Simons et al. (1965), this study reveals that the total aeolian transportation originated by the east winds towards Paracuru is estimated in 93,02 m³/m/year, while towards the sea (by southeast winds) is estimated in 37,10 m³/m/year. Consequently, the material bulk transported towards the sea is approximately 1/3 of the capacity of the one transported towards Paracuru town. With current wind conditions and pluvial precipitations maintained, part of Paracuru town will be buried by the dunes in a long-term basis, approximately 120 years.

Palavras-Chave: dunas costeiras, migração de dunas e soterramento.

Key words: coastal dunes, mobile dune and buried.

INTRODUÇÃO

A área selecionada para o presente trabalho encontra-se inserida no município de Paracuru à noroeste de Fortaleza, capital do Estado do Ceará - Brasil, foi denominada de sistema sedimentar eólico transversal. A morfologia da linha de costa e o transporte eólico muito direcional fazem com que o sistema seja classificado como transposição de sedimento sobre promontório (Figura 1). Os sedimentos são transportados da praia para o interior, migram em direção a cidade de Paracuru, e retornam parcialmente ao mar através do sistema hídrico local ou pelas dunas que constituem a planície de deflação. Na região os ventos, deslocam-se em duas direções distintas: Na direção principal N 260° E, as dunas deslocam-se em direção a cidade de Paracuru, soterrando recursos hídricos e a malha urbana. Na direção secundária, N 310° SE, desloca-se em direção à linha de costa até o terminal da PETROBRAS, sendo aí re-introduzida no sistema de deriva litorânea. Em ambas as situações o sistema é caracterizado como transposição de dunas sobre promontório "*headland bypass dune field*", em que a areia penetra na praia e sai parcialmente no sistema de drenagem ou no mar. O presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de migração de dunas de forma que se

possa estabelecer a sua evolução e, assim, projetar cenários futuros para a planície costeira da cidade de Paracuru.

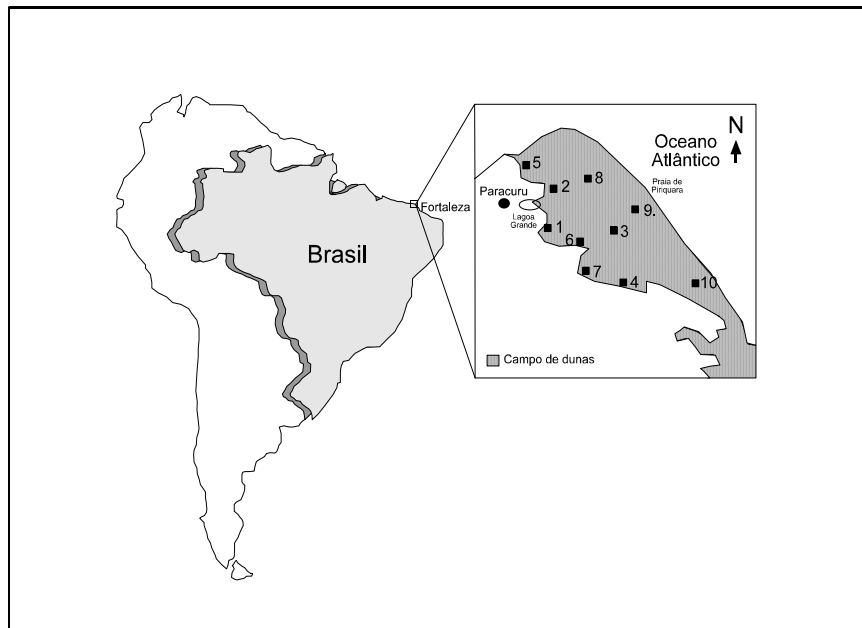


Figura 1. Mapa de localização e pontos de monitoramento de dunas em Paracuru - Ceará

MATERIAL E MÉTODO

As principais técnicas empregadas foram as de fotointerpretação e geoprocessamento, combinadas, em todas as fases da pesquisa, a um controle sistemático de campo (monitoramento). A área restituída, com uma superfície aproximadamente de 170 km², está recoberta pelas fotografias aéreas do levantamento aerofotogramétrico do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca - DNOCS (1958), escala 1:25.000 e fotos aéreas na escala 1:25.000 (1999), cedidas pela Aerofoto Nordeste. Os pontos de monitoramento referentes à migração de formas eólicas (dunas) foram estabelecidos a partir de levantamentos topográficos realizados pelo SEMACE (1991) na escala 1:4000 na área de entorno da Lagoa Boca do Poço, e pela GEOCONSULT (1998), escala 1: 10.000 na região do campo de eólianitos próximo a praia de Piriquara. Em seguida estes pontos foram transferidos para folha base, escala 1: 25.000. Como instrumental para realização desta etapa de trabalho contou-se apenas com o uso de fotografias aéreas citadas e coordenadas checadas em campo através de um GPS (Global Position System). As fotografias foram devidamente escaneadas e geo-referenciadas. Sabendo-se que é um procedimento passível de erro, procurou-se minimizar os mesmos através de desvio padrão. O primeiro passo para resolução do problema proposto foi o preparo das informações em base digital - Idrisi for Windows / Auto CAD - R14. Essas informações foram geo-referenciadas com base em pontos conhecidos e predeterminados (coordenadas geográficas) para posterior elaboração dos planos de informações e vetorização das feições morfológicas. Objetivando compreender localmente a dinâmica dos processos eólicos na região e a variabilidade interanual das precipitações pluviométricas, realizou-se uma campanha de monitoramento por mais de dois anos (02 / 04 / 98 à 13 / 06 / 00). Foi

selecionada uma duna barcana, denominada de B1 (UTM, 96221720), localizada sobre a planície de deflação, cuja origem e evolução morfológica associa-se a um período extremamente seco possivelmente relacionado ao fenômeno El Niño de 1993. Esta duna encontra-se a sotavento de um campo de eólianitos, afastada de qualquer tipo de obstáculo que pudesse influenciar os processos sedimentares de trânsito e deposição de areia. Para a realização do monitoramento, tomou-se como referência uma cerca de arame farpado, orientada paralelamente à crista da duna. Foram utilizados também marcos de madeira segundo uma linha orientada perpendicular à crista, ou seja, disposta segundo a direção dominante de migração. A medida em que a duna avançava, a cerca de arame era marcada com tinta acrílica e realizada, conseqüentemente, a medição. As medidas foram tomadas em intervalos de três meses para que se pudesse detectar possíveis variações no regime pluviométrico e de ventos. Os resultados obtidos se encontram resumidos através da Tabela 2.

RESULTADOS OBTIDOS

A utilização de técnicas de geoprocessamento, permitiu uma interpretação espaço - temporal entre 1958 (registro da primeira foto aérea) à 1999 (registro do último sobrevôo), tendo como base disponível fotografias aéreas na escala de 1: 25.000. Em 1958 o sistema eólico transversal de Paracuru apresentava uma área total de 8.396.711 m². A planície de deflação constituída por lençóis de areia e a faixa de praia representavam 6.440,736 m² e 4.545,2 m² respectivamente. No ano de 1999, apesar do registro aéreo ser similar ao de 1958 em termos de estação do ano (período seco), constatou-se uma expansão do sistema de dunas transversais para 8.642,590 m². A planície de deflação e a faixa de praia decresceram respectivamente em termos de área para

6.258,752 m² e 4.542,82 m². Os resultados da superposição entre os registros aéreos de 1958 e 1999 constam na tabela 1. Observou-se que as principais áreas de soterramento localizam-se entre o reservatório da

Lagoa Grande e o córrego Boca do Poço. A Tabela 1, mostra as diferenças em recobrimento espacial (m²) da expansão ou retração do sistema eólico, entre 1958 a 1999.

Tabela 1. Diferenças em recobrimento espacial do sistema sedimentar eólico de Paracuru no período de quarenta e um anos.

Compartimento	Foto aérea – 1958	Foto aérea – 1999	Diferença m ²
Dunas	8.396,711 m ²	8.642,590 m ²	+ 245.879
Planície de deflação	6.440,736 m ²	6.258,752 m ²	- 181.934
Praia	454.882 m ²	454.282 m ²	- 600

Ao longo do período de monitoramento, verificou-se que as precipitações pluviométricas na região exercem uma forte influência no transito de sedimento e na migração das dunas. Durante a estação chuvosa (fevereiro a maio) a taxa de migração de duna é mínima, no entanto nunca chega

a ser interrompida, devido a intervalos de dias sem chuva e a potencia do vento sobre a região. Na estação seca (junho a janeiro), o processo de migração é retomado, atingindo valores bastante significativos (Tabela. 2).

Tabela 2. Taxa trimestral de avanço de dunas e pluviometria em Paracuru / Ce, entre abril de 1998 a junho de 2000.

Trimestre	2º abril - junho 1998	3º Jul. - Set. 1998	4º Out. - Dez. 1998	1º Jan. - Mar. 1999	2º Abril - Junho 1999	3º Jul. - Set. 1999	4º Out. - Dez. 1999	1º Jan.- Mar. 2000	2º Abril - Junho 2000
Precipitação (mm)	656	13	12	681	665	31	28	552	239
Avanço trimestral de duna (m)	2,7	6,8	6,9	1,9	2,1	8,3	7,0	2,0	2,8

DISCUSSÃO

Conforme resultados obtidos através de determinações em fotografias aéreas verticais de diferentes datas de vôo e método direto no terreno, as taxas de avanço de migração de avanço de dunas em Paracuru apresentam valores diversificados nos pontos monitorados. A distribuição dos pontos inseridos na figura 1 permite uma visualização destes resultados. No ponto 5, junto à linha de praia a velocidade de migração é de 9,14 m / ano, enquanto no extremo oposto correspondente ao ponto 6, os valores obtidos atingem 12,56 m / ano. Os resultados na área de entorno da Lagoa Grande, pontos 1, 2 e 8, apresentam deslocamentos de dunas bastante significativo com uma média de aproximadamente 11 m / ano. No ponto 3, localizado na parte central do campo de dunas, a velocidade de migração é de 6,25 m / ano. Verificou-se que as dunas isoladas de menor tamanho são aquelas que apresentam uma maior velocidade de deslocamento aproximadamente 19,0 m / ano. Tal fato deve-se ao estado

de equilíbrio e a natureza tridimensional das dunas barcanas que se mantêm passiva de erosão pelo vento, mantendo suas características morfológicas após o deslocamento. O ponto 4, constituído por dunas longitudinais, apresentou deslocamento mínimo em torno de 1 m / ano, devido a remoção local da cobertura vegetal. A ausência de deslocamento identificado através do ponto 10, deve-se ao processo diagenético de cimentação sobre as dunas obliquas (eólianitos) que impede a movimentação de sedimento. Os resultados obtidos mostram que o processo de migração das dunas móveis é proporcional à altura e tamanho das mesmas, ou seja, quanto maior a altura e o tamanho, menor é a velocidade de migração. Tal fato deve-se a uma série de fatores ambientais, entre estes, tamanho e altura, posição em relação à pista de vento “fetch”, natureza tridimensional e volume dos depósitos eólicos. Os resultados obtidos através da tabela 2, mostram que o deslocamento anual das dunas é proporcional aos índices pluviométricos

registrados na região. Ou seja, quanto maior for este índice menor será a migração das dunas. O método de determinação direta no terreno permitiu avaliar as variações plurianuais do transporte eólico e a migração de dunas. Os resultados obtidos confirmam que estas variações dependem das precipitações pluviométricas e do regime de ventos (E - ESE). Por ocasião da estação chuvosa (fevereiro a maio), o transporte de sedimento em direção ao campo de dunas é parcialmente interrompido, atingindo velocidades de migração em torno de 2,1m trimestral. Durante a estação seca aproximadamente 8 meses / ano, o transporte de sedimento eólico é retomado atingindo taxas de 8,3 m trimestral. Neste sentido, a velocidade de migração das dunas durante este período é $\frac{1}{4}$ do valor médio obtido durante a estação seca.

A correlação entre as variações pluviométricas e o processo de migração de dunas é notória. Observou-se durante o período analisado que o transporte de sedimento em direção ao campo de dunas é inversamente proporcional ao índice pluviométrico, ou seja, quanto maior for este índice menor será o transporte. No entanto, o transporte nunca é totalmente interrompido, devido às condições semi-áridas da região e intervalos de dias sem precipitação pluviométrica durante a estação chuvosa.

CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos e resultados obtidos, chegaram-se as seguintes conclusões sobre o processo de migração de dunas no sistema sedimentar eólico estudado:

A presença de fácies da Formação Barreiras mais resistentes à erosão, originou uma seqüência de promontórios em toda costa do Estado do Ceará, entre os quais a Ponta de Paracuru. Esta feição ocorre ao longo de uma faixa de terreno em forma de concha fechada para o mar, com aproximadamente 2.400 metros de extensão e 600 metros de largura. O regime de vento e a posição morfológica em relação à orientação regional da linha de costa, caracterizam o transporte de sedimento eólico, como de transposição sobre promontório "*headland bypass dune field*".

Através do método de determinação direta no terreno verificou-se que o processo de migração de dunas depende das precipitações pluviométricas e do regime de ventos. Durante a estação chuvosa (fevereiro a maio), o transporte de sedimento em direção ao campo de duna é parcialmente interrompido, atingindo velocidades de migração em torno de 2,1m trimestral. Na estação seca aproximadamente 8 meses / ano, o transporte de sedimento eólico é retomado atingindo taxas de 8,3 m trimestral. Neste sentido, a velocidade de migração das dunas durante a estação chuvosa é aproximadamente $\frac{1}{4}$ do valor médio obtido durante a estação seca.

A superposição de fotografias aéreas verticais de diferentes datas de vôo mostrou-se eficiente quanto ao estudo de expansão de dunas em períodos distintos. Constatou-se que a zona de retenção (dunas transversais) se expandiu em 245,879 m², durante os 42 anos analisados. Ou seja, a cada ano a região da planície costeira junto à cidade de Paracuru perde aproximadamente 6000m² de área agricultável e urbana.

Foi observado também que o processo de soterramento decorrente da migração de dunas é mais significativo nas imediações do reservatório Lagoa Grande. As estimativas de taxas de transporte eólico, obtidas através da expressão proposta por Simons et al. (1965) permitiram confirmar a existência de duas direções de transporte de sedimento na região do sistema estudado. A estimativa total de transporte de material em direção a cidade de Paracuru é de 93,02 m³/m/ano, enquanto em direção ao mar é de 37,10 m³/m/ano. Esses valores aproximam-se dos resultados obtidos por Werner et al. (1988) para o sistema de dunas transversais de Alexandria - África do Sul. Portanto o volume de material em direção a planície costeira de Paracuru é aproximadamente 3 vezes maior em relação ao material a ser re-introduzido no sistema de deriva litorânea anualmente.

As variações do regime de vento e precipitações pluviométricas condicionam a evolução morfológica do sistema eólico estudado. Durante a estação chuvosa (fevereiro a maio) o volume de material transportado em direção à zona de retenção é parcialmente interrompido, enquanto na estação seca (junho a janeiro) é retomado. O transporte de sedimento em direção ao campo de dunas é proporcional ao índice pluviométrico, ou seja, quanto maior for este índice menor será o transporte.

Através deste trabalho conclui-se que as transformações ocorridas no sistema eólico de Paracuru são decorrentes de processos naturais, principalmente os relacionados ao regime de vento unimodal e quantidade de sedimentos finos trazidos para a zona de retenção do sistema (dunas transversais). Estas alterações tornaram-se mais aceleradas, quando nas últimas três décadas, o crescimento urbano de Paracuru se deu em direção ao campo de dunas. Mantida a sazonalidade climática regional caracterizada por duas estações (seca e chuvosa) somada a ocorrência de fenômenos do tipo El Niño e La Niña, estimou-se que a cidade de Paracuru será soterrada pelas dunas em 120 anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGNOLI, E. Projeto experimental de vegetação de dunas costeiras do município de Paracuru - Ce: Um exemplo de um envolvimento da PETROBRAS na solução de um problema da comunidade. In: Simpósio Sobre Processos Sedimentares e Problemas Ambientais na Zona Costeira Nordeste Brasil 1°. Centro de Tecnologia e Geociências / UFPE, 1995. 17 - 19 p.
- BARBOSA, L.M.; 1997. Campos de dunas costeiras associados à desembocadura do Rio São Francisco (SE / AL): Origem e Controles ambientais. Salvador / UFBA - Instituto de Geociências - Departamento de Geologia, 1997. 199 p. Tese (Doutorado).
- CASTRO, J.W.A. Geomorfologia do sistema sedimentar eólico de Paracuru - Ceará. Rio de Janeiro / UFRJ - PPGG - IGEO, 2001. 202 p. Tese (Doutorado).
- MCKEE, E.D. Introduction to a study of global sand seas. In: Mckee, E.D. (ed.) A study of global sand seas. U.S. Geological Survey Professional Paper 1052, 1979. 1 - 20 p.
- MULLER, G. Petrology of the cliff limestone, North Bimini, Bahamas. Geol. Paleontology. Monatshefte II, 1970. 485 - 496 p.

- NICKLING, W.G. Aeolian Geomorphology. Allen and Unwin. London, 1986. 311 p.
- NORDSTRON, K.F; PSUTY, N.P. & CARTER, R.W.G. (eds). Coastal Dunes: Form and Process. Wiley, New York, 1990. 489 p.
- PARKER GAY JR. Origen, distribution y movimiento de las arenas eolicas en el area de Yauca e Palpa. Congreso Nacional de Geologia - Peru, 2, tomo 37, 1962. 37 - 58 p.
- SIMONS, D.B.; RICHARDSON, E.V. & NORDIN, C.F. (1965) - Bedload Equation for Ripples and Dunes. U S Geological Survey, Washington, 462 (2): 1 - 9 p.
- WERNER, K; ILENBERGUER, W.K. & RUST, I. A sand budget for the Alexandria coastal dunefield, South Africa. Sedimentology 35, 1988. 513 - 521 p.