



Dinâmica Sedimentar das Dunas Transgressivas do Sistema Laguna-Barreira da Costa Sul de Moçambique, África
Sedimentary Dynamics of the Transgressive Dunes of the Lagoon-Barrier System of the Southern Mozambique Coast, Africa

Lucas Lavo António Jimo Miguel^{1,2,3} & João Wagner Alencar Castro^{1,2}

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia - PPGL, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, 21941-916, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia e Meio Ambiente – LAGECOST, Quinta da Boa Vista, 20940-040, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³Ministério das Relações Exteriores do Brasil, Projeto de Cooperação Internacional, Esplanada dos Ministérios, Brasília, DF, Brasil.

E-mails: lucaslavomiguel@yahoo.com.br; jwcastro@gmail.com

Recebido em: 30/01/2018 Aprovado em: 15/03/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_222_231

Resumo

Dunas transgressivas são muito comuns na região costeira do sudeste da África. Apresentam grande potencial de informações sobre o regime de ventos regionais, o suprimento de sedimentos e respostas às flutuações do nível relativo do mar durante o Holoceno. Foram estudados os condicionantes climáticos regionais e a dinâmica sedimentar eólica das dunas transgressivas associadas ao sistema laguna - barreira da costa sul de Moçambique. Analisou-se informações de regime de ventos, precipitação pluviométrica, registros de temperatura atmosférica complementadas por monitoramento da movimentação anual de dunas transgressivas. Dados obtidos sugerem que as dunas costeiras associadas a esse sistema são controladas principalmente pelo regime de vento do quadrante sudeste e precipitação pluviométrica anual de 1600 mm. A combinação do potencial de transporte de sedimento eólico estimado em ~46 kg/m/s com a mobilidade eólica de ~200, denota intenso processo de assoreamento sobre o sistema lacustre-lagunar da área estudada. A aplicação de modelos matemáticos de dinâmica sedimentar permitiu a identificação de duas características morfológicas distintas de campos de dunas, ativas e semi-vegetadas da área sul (Província de Maputo), e dunas semi-vegetadas e fixas da área norte (Província de Gaza), Moçambique - África.

Palavras-chave: Dunas holocênicas; Taxa de movimentação; Mobilidade de sedimentos; Moçambique; África

Abstract

Transgressive dunes are very common in the southeastern coastal region of Africa. They have the potential to yield important information about regional winds, sediment supply and their response to sea-level fluctuations during the Holocene. The regional climatic patterns and the wind dynamics of the transgressive dunes associated with the barrier lagoon system of southern Mozambique were studied. Rainfall record, wind regime and atmospheric temperature records were analysed, complemented by annual monitoring of transgressive dune progradation. Data obtained suggest that the coastal dunes associated to lagoon-barrier system are mostly controlled by the southeast quadrant wind regime and annual rainfall indexes of about 1600mm. The combination of the sediment transport potential estimated at ~ 46 kg/m/s with sand mobility of ~200, resulted in the intense silting process on the lacustrine and lagoon systems. The application of mathematical models of sedimentary dynamics permitted the identification of two distinctive morphological characteristics of dunefields including active and semi-vegetated dunes on the southern area (Maputo Province), and semi-vegetated and fixed dunes on the northern area (Gaza Province), Mozambique - Africa.

Keywords: Holocene dunes; Dune migration; Sediment mobility, Mozambique; Africa

1 Introdução

As variações do nível relativo do mar durante o Holoceno ao longo do litoral sudeste da África, favoreceram o desenvolvimento de um sistema laguna - barreira, ocupado por dunas fixas e móveis que se projetam sobre ambientes lacustres e lagunares atuais (Ramsay, 1995; Armitage *et al.*, 2006; Benallack *et al.*, 2016; De Lecea *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2017). Esse sistema caracteriza-se por cordões contínuos paralelos a linha de costa entre o mar e corpos lacustres - lagunares. Dillenburg & Hesp (2009) sugerem que o desenvolvimento desses ambientes de sedimentação, associam-se a baixa declividade do perfil de praia em costas dominadas por ondas. A atuação persistente do clima de ondas, favorecido pelo regime de meso-maré e ventos com velocidades superiores a 6.0 m/s propiciam o desenvolvimento de campos de dunas transgressivos nesse segmento de litoral africano.

Castro *et al.* (2017) sugerem que a origem e a evolução de depósitos eólicos costeiros dependem de processos pelos quais o vento que sopra sobre a praia, pode transportar sedimentos da superfície e movê-los para o interior do continente, originando dunas. Goldsmith (1978) define que a presença dessas dunas costeiras é determinada pela relação de três fatores: disponibilidade de sedimentos soltos, ação do vento com força razoável para retrabalhar e transportar o sedimento, bem como espaços apropriados de estocagem.

A disponibilidade de sedimentos soltos ou parcialmente protegidos por vegetação em dunas costeiras propicia o transporte de sedimento eólico decorrente da ação de cisalhamento do vento (Lettau & Lettau, 1978; Lancaster, 1988; Castro, 2001; Sauermann *et al.*, 2003; Jimenez *et al.*, 2009; Tsoar *et al.*, 2009; Hein *et al.*, 2012). Esses estudos sugerem que o fluxo eólico pode ser estimado a partir de medições de campo ou aplicação de métodos empíricos. Modelos físicos ou matemáticos, envolvendo a força de cisalhamento do vento, índice pluviométrico, temperatura atmosférica, cobertura da vegetação e níveis de lençóis freáticos, permitem estimar taxas de transporte eólico em diferentes escalas. Essas taxas são relevantes para entender a evolução morfológica e a taxa de movimentação de dunas transgressivas (Sauermann *et al.*, 2003).

O alto potencial de transporte de sedimento eólico no segmento costeiro entre o Rio Save em

Moçambique até o complexo estuarino de Saint Lucia, África do Sul, propicia o desenvolvimento de dunas transgressivas costeiras com orientação sudeste-noroeste. Segundo Castro *et al.* (2017) as maiores taxas de movimentação de dunas ocorrem durante a estação seca e as menores na estação chuvosa ou úmidas. Durante o período seco registra-se soterramento intensivo nos sistemas lacustre-lagunares de retaguarda e colmatção de canais de ligação com o mar aberto.

No presente trabalho, estuda-se a dinâmica sedimentar eólica do campo de dunas transgressivo associado ao sistema laguna - barreira da costa sul de Moçambique - África. Baseado em modelos matemáticos analíticos, envolvendo taxas de transporte de sedimento eólico, potencial de deriva eólica e índice de mobilidade das dunas são apresentados novos dados sobre a dinâmica sedimentar da costa sul de Moçambique.

1.1 Área de Estudo

As dunas transgressivas do sistema laguna-barreira da costa sul de Moçambique - África, caracterizam-se por feições morfológicas quase que paralelas a linha de costa entre o oceano e corpos lagunares e lacustres de retaguarda (Figura 1). O desenvolvimento dessas dunas é controlado pela exposição persistente da planície costeira a ação dos ventos, regime de meso-marés e variações do nível relativo do mar ocorridas durante o Holoceno. Ramsay (1995), Cooper & Pilkey (2002), Botha *et al.* (2003), Armitage *et al.* (2006) constataram que o sistema de dunas transgressivas dessa região está entre os maiores da África e do mundo. A progradação dessas dunas no sentido leste - oeste favorece a projeção das mesmas em direção ao interior, promovendo muitas vezes, o assoreamento ou colmatção de corpos lacustres ou lagunares. Nos ambientes da retaguarda dos sistemas lagunares, desenvolveram-se paleodunas resultantes das variações de padrões paleoambientais, relacionadas à última transgressão holocênica.

Sobre o sistema laguna-barreira e nas sucessões sedimentares das dunas transgressivas, encontram-se diferentes feições morfológicas, entre estas, paleopraias (*beachrocks*), praias, dunas (barcanas, barcanóides, parabólicas e coppice), paleodunas, ambientes lagunares e lacustres. Estudos realizados por Armitage *et al.* (2006),

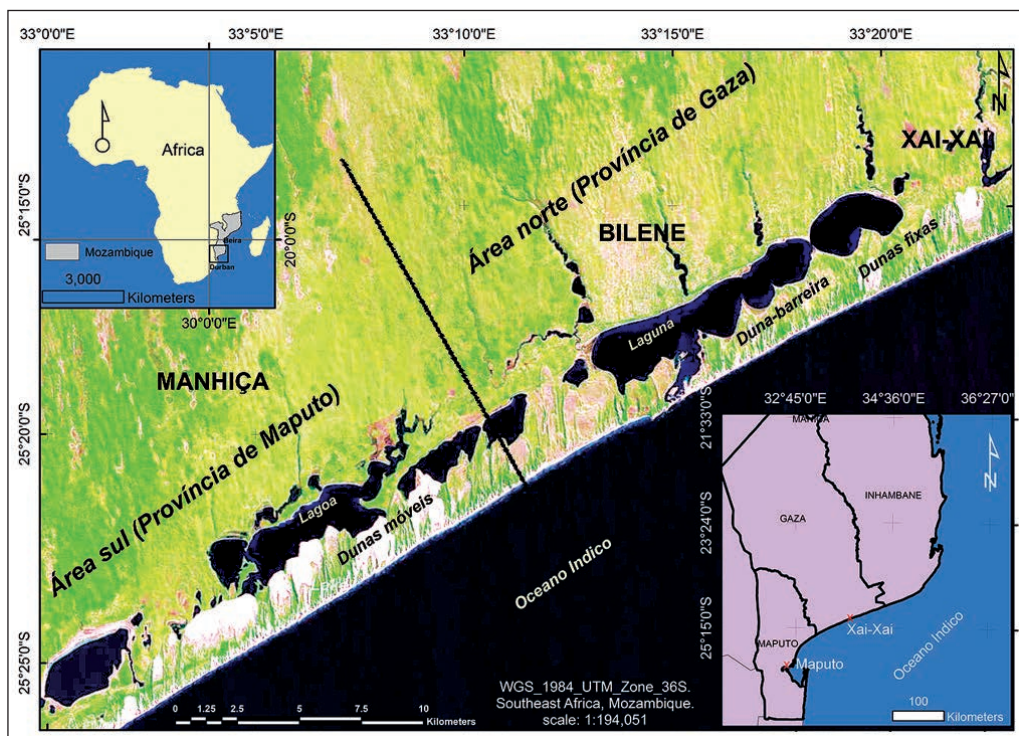


Figura 1 Localização do sistema laguna-barreira da costa sul de Moçambique, África. Localização das estações meteorológicas de Maputo (25° 57' 36''S; 32° 27' 36''E) e Xai-Xai (25° 02' 24''S; 33° 38' 24''E).

Siesser (1974), Ramsay (1995), Perry (2004) e Waelbroeck *et al.* (2002), sugerem que a formação desse sistema eólico que se estendem desde o rio Save, na Província de Inhambane, até Durban na República da África do Sul, iniciou desde o Pleistoceno, estendendo-se até o Holoceno. Esses sistemas eólicos transgressivos desenvolvem-se de forma diferente conforme o balanço de sedimentos e a existência de espaços de deposição/estocagem. Nesses espaços são identificados depósitos de eolianitos e *beackrocks* que datam entre 1100 anos A.P e 900 anos A.P. (Siesser, 1974; Ramsay, 1995; Ramsay & Cooper, 2002; Armitage *et al.*, 2006;). Essas informações são corroboradas pelo grande volume de material depositado nas dunas que se movimentam para interior em resposta ao regime de vento, favorecido por longos períodos sem chuva e variação maregráfica inferior de até 4,0 m.

O clima da região é tropical úmido na escala de Köppen, influenciado por células tropicais anti-ciclônicas de baixa pressão e por frentes polares antárticas (Miguel *et al.*, 2017a, 2017b). Duas estações sazonais são bem distintas: o verão entre setembro e março e o inverno de abril a agosto. Segundo Været *et al.* (2011) a precipitação pluviométrica anual é de aproximadamente 1.300 mm/ano com uma temperatura média mensal de ~23°C. O índice de evaporação anual média, excede 1.100 mm/ano (1954 a 2001). A precipitação máxima ocorre entre

dezembro e março quando a zona de convergência intertropical atinge a região mais meridional (Moore *et al.*, 2008) da região sudeste de África. Langa (2007) e Miguel *et al.* (2017b) observaram que o regime médio mensal dos ventos varia entre 3,5 m/s e 8,5 m/s com frequências predominantes do NE, E, SE, S e SW. Os ventos persistentes do SE é o principal responsável pela geração de ondas com altura máxima de 1,5 m.

A combinação do clima de ondas com o regime de meso-maré de 4,0 m favorece correntes de deriva litorânea no sentido sul-norte com velocidade de aproximadamente 0,60 m/s (De Lecea *et al.*, 2017). As correntes marinhas em alto mar apresentam direção predominante norte - sul, decorrentes de giros periódicos anti-ciclônicas e ciclônicas (Halo *et al.*, 2014). Esses giros influenciam sobremaneira o transporte de massas de água da corrente quente do canal de Moçambique, afetando o regime sazonal das estações do sudeste da África (Moore *et al.*, 2008; Ramsay, 1995; Armitage *et al.*, 2006).

2 Materiais e Métodos

As dunas transgressivas do sistema laguna - barreira da costa sul de Moçambique em África, foram estudadas do ponto de vista dos condicionantes climáticos que impulsionam a dinâmica sedimentar

eólica regional. As taxas de transporte de sedimentos eólicos foram obtidas através da análise de registros de velocidade e direção do vento entre 1960 e 2015, dados de precipitação pluviométrica entre 1960 e 2012, e temperatura atmosférica de 1960 a 2012, complementadas por técnicas de monitoramento de campo.

A análise do regime de ventos foi realizada através de registros históricos entre 1960-2015 de três estações meteorológicas, uma na província de Gaza em Xai-Xai, outra na província de Maputo e a outra na estação regional meteorológica da NASA (25° 20' 00" S - 33° 10' 00" E). Com base no registro histórico de dados da velocidade e direções do vento, selecionou-se velocidades superiores a 6,0 m/s, limite mínimo estabelecido por Castro (2001) e Tsoar (2005, 2013). Esse limite permite o início do transporte de sedimento eólico e sua deposição, incluindo dunas transgressivas parabólicas, barcanas e coppices. Classificou-se as orientações do vento para todos quadrantes. Determinou-se o potencial da taxa de transporte de areia conforme modelo proposto por Lettau e Lettau (1978).

$$Q = C_b \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho}{g} (w - w_{ref}) w^2 \quad (1)$$

Onde C_b é constante ($C_b = 6,7$; Lettau e Lettau, 1978); d indica o tamanho mediano do grão do sistema de dunas estudado (0,375 mm); D é um tamanho de grão de referência (0,25 mm); ρ é a densidade do ar (1,22 kg/m³); g é a aceleração de gravidade (9,81 m/s²); w é a velocidade de vento registrada por hora na estação da NASA 25° 20' 00" S - 33° 10' 00" E; e w_{ref} indica a velocidade limiar de fricção (6 m/s).

O potencial de deriva (DP) foi determinado através da aplicação da equação proposta por Fryberger's (1979):

$$DP = w^2 (w - w_{ref}) t \quad (2)$$

Onde w é a velocidade superior a 6,0 m/s; $w_{ref} = 6,0$ m/s e t é o incremento de tempo em relação às medidas anuais de registro de dados de vento em porcentagem.

A classificação do tipo de dunas foi realizada através dos dados obtidos a partir da técnica de Fryberger (1979) e integradas no modelo proposto por Yizhaq *et al.* (2008). Um índice de mobilidade

eólico (M) foi calculado usando a equação de Lancaster (1988).

$$M = W \frac{ETP}{P} \quad (3)$$

Em que W é a porcentagem anual de vento superior a 6,0 m/s entre o período de 1979 a 2016; P é a média anual de precipitação pluviométrica (P) entre 1960 a 2012; A média anual de evapotranspiração (ETP) é de 1100 mm conforme (Været *et al.*, 2011). Conduziu-se um monitoramento anual da migração de dunas visando determinar a taxa de movimentação de dunas entre janeiro de 2016 a fevereiro de 2017. Esse método apesar de simples é efetivo na medição de taxas de movimentação de dunas e volumes de sedimentos eólicos transportados em campos de dunas (Castro, 2001).

3 Resultados

Resultados obtidos do regime de ventos correspondente ao período entre 1979 e 2016, indicaram uma velocidade média mensal de ~8,0 m/s (Figura 2). Essa velocidade indica um potencial mensal favorável para o transporte de sedimentos eólicos soltos sobre a planície de deflação da praia, e nas dunas sem cobertura de vegetação nos períodos secos (entre abril e outubro). A média de dados de vento analisado em 52 anos apresentou variações entre 5,0 m/s e 9,0 m/s, proveniente dos diversos quadrantes N, NNW, NW, WNW, W, WSW, SW, SSW, S, SSE, SE, ESE, E, NNE, NE e SE. Essas orientações de regime de vento são responsáveis pela definição de várias feições morfológicas sobre os depósitos eólicos do sistema laguna-barreira da costa sul de Moçambique.

Observou-se que a velocidade do vento apontou atividade eólica persistente proveniente dos seguintes quadrantes: S = 14,3%, SSE = 21%, SE = 13%, E = 7,3%, ESE = 7,2%, NNE = 6,9% e N = 10% (Figura 3). Essas orientações são principalmente provenientes do quadrante sudeste com ventos que atingem cerca de 22 m/s no período seco ou nos períodos de transição entre inverno e verão. Observou-se ventos com maior potencial no período seco entre os meses de julho e dezembro com média máximo de 12,2 m/s. Velocidades mínimas de vento foram observadas no período entre março e junho estimado em 2,0 m/s, resultante de diversas orientações.

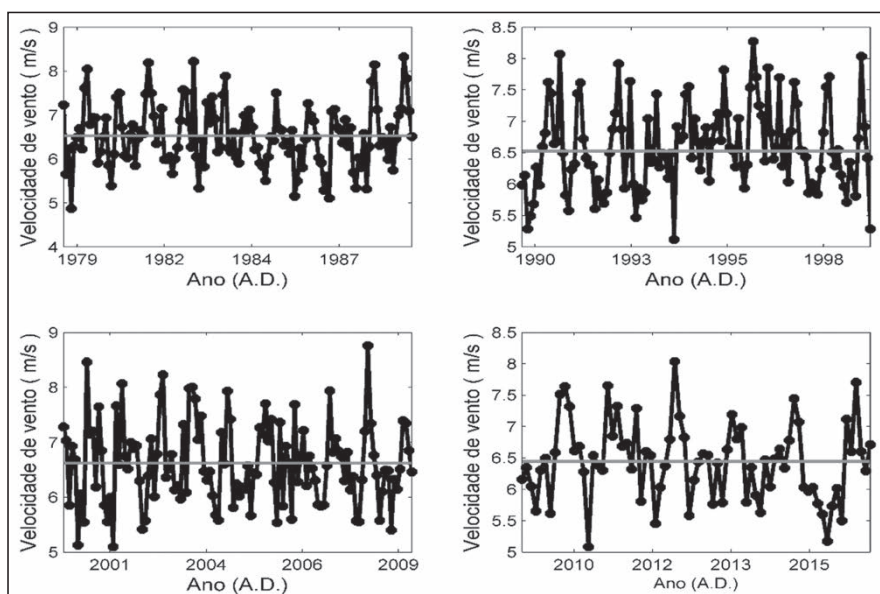


Figura 2 Médias mensais de vento na estação da NASA (25° 20' 00" S - 33° 10' 00" E) entre 1979 e 2015.

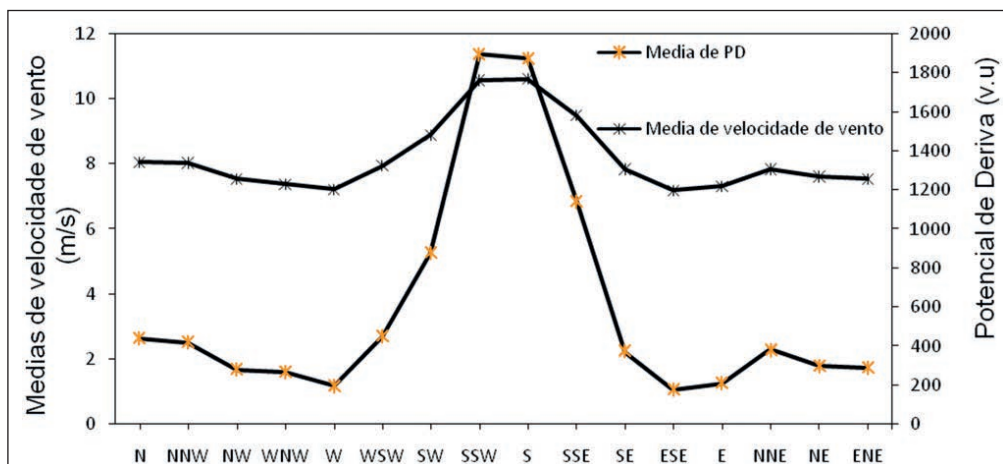


Figura 3 Potencial de deriva eólico e média de velocidade do vento.

O regime de ventos sazonais descritos para todos quadrantes estabelece taxa de transporte de sedimento eólico de 1,34 kg/m/s conforme equação proposta por Lettau e Lettau (1978). A grande contribuição foi proveniente dos quadrantes SW = 0,13 kg/m/s, SSW = 0,28 kg/m/s, S = 0,27 kg/m/s e SSE = 0,17 kg/m/s. Esse transporte eólico é resultado do potencial eólico anual que variou significativamente entre 6,0 kg/m/s e 46 kg/m/s, no período de 1980 a 2015. A taxa de maior transporte foi caracterizada com maior PD = 1193 v.u, baixa precipitação = 354 mm/ano e alto índice de mobilidade eólico = 318 (Tabela 1). As taxas de menor transporte foram caracterizadas por valores de baixo potencial de deriva, elevada precipitação superior a 500 mm/ano, e índices de mobilidade relativamente baixos. A ocorrência sazonal desses fatores climáticos é condição principal que contribui na definição de características morfológicas das

feições eólicas do sistema. Sua dinâmica sedimentar pode ser estabelecida pela capacidade do potencial de deriva dos ventos regionais em gerar energia suficiente capaz de transportar sedimentos soltos na planície de deflação ou nos depósitos eólicos existentes.

O potencial de deriva - PD determinado através da equação proposta por Fryberger (1979) apresentou uma média de 382 v.u (Tabela 1). Os meses que apresentaram maior potencial de deriva entre 1979 e 2016 foram: junho = 1085, julho = 1573 v.u, agosto = 3030 v.u, setembro = 2832 v.u e novembro = 2011 v.u. E o índice de mobilidade eólica - M através da equação proposta por Lancaster (1988) foi estimado em 50 a 200 entre 1979 e 2016 (Tabela 1). Enquanto que as determinações diretas no terreno de movimentação de uma duna parabólica sobre o primeiro cordão litorâneo do sistema laguna - barreira da área sul foi de 23 m/ano.

A análise da precipitação indicou entre 250 dias/ano e 300 dias/ano sem chuva. Os dias com precipitação pluviométrica superior a 500 mm ano variaram entre 60 dias/ano e 120 dias/ano.

Anos\DP	DP (v.u)	M=w (ETP/P)	Q (kg/m/s)	Anos\DP	DP (v.u)	M=w (ETP/P)	Q (kg/m/s)
1980	112	88	20	1998	106	62	20
1981	529	53	37	1999	429	52	14
1982	195	135	24	2000	443	37	28
1983	532	94	25	2001	691	71	28
1984	347	50	32	2002	358	161	29
1985	257	62	13	2003	1193	187	46
1986	91	123	14	2004	324	67	21
1987	200	97	10	2005	749	118	30
1988	-	96	18	2006	348	70	23
1989	45	93	38	2007	701	68	27
1990	474	63	13	2008	44	98	28
1991	319	102	28	2009	221	80	18
1992	217	108	16	2010	568	63	23
1993	175	74	16	2011	371	81	25
1994	89	134	28	2012	489	107	24
1995	323	99	37	2013	438	--	18
1996	722	73	43	2014	351	--	6
1997	411	64	43	2015	496	--	21

Tabela 1 Resultados de potencial de deriva eólica, Índice de mobilidade eólica (M) e potencial de transporte de sedimento eólico médio (Q) na estação meteorológica de Xai-Xai.

Foram identificados na área de estudo dois segmentos de dunas transgressivas bem distintos: o primeiro é representado pelo segmento sul, correspondente a Província de Maputo. Caracteriza-se por dunas ativas (móveis) e semi-vegetadas que soterram o sistema lacustre de retaguarda. O segundo é representado pelo seguimento norte correspondente a Província de Gaza. Caracteriza-se por depósitos eólicos constituídos por dunas fixas (vegetadas) e semi-vegetadas, posicionadas frontalmente ao sistema lagunar.

4 Discussão

Resultados obtidos sobre o regime de ventos demonstram que o principal fator que promove o transporte anual de sedimentos eólicos são ventos de direção SE. Essa atividade eólica persistente é a principal responsável pelo desenvolvimento de feições morfológicas sobre cordões arenosos que se projetam para o interior na forma de dunas do tipo barcanas, parabólicas e coppice (montículos de areia eólica com vegetação no topo). As feições barcanas e parabólicas sugerem um potencial sedimentar eólico superior a 400 v.u predominantemente proveniente

de WSW, SW, SSW, S, SSE e SE. Essas direções de ventos são sazonais, intensificam-se entre os meses de junho a novembro. Conforme classificação proposta por Fryberger (1979), o potencial de deriva entre 200 v.u e 400 v.u encontrado é considerado intermediário, confirmado por Langa (2007) e Miguel *et al.* (2017b) na mesma região. Em regiões com esse tipo de potencial de deriva são registradas explosões de campos dunas eólicas móveis, geralmente parabólicas e semi-vegetadas conforme disponibilidade de sedimentos soltos, índices pluviométricos e níveis de lençóis freáticos de água.

A análise temporal da variabilidade do vento entre 1979 e 2016 indicou ventos com alta capacidade de transporte anual de sedimentos eólicos. Esse transporte é também resultado da combinação do efeito da mobilidade de sedimentos, do regime pluviométrico, a evaporação, do nível de lençol freático, a fonte de sedimentos, a temperatura atmosférica, os efeitos episódicos - ENSO e cobertura da vegetação. Apesar do complexo envolvimento desses fatores na dinâmica sedimentar do sistema laguna-barreira estudado, o regime de ventos e a alta mobilidade dos sedimentos eólicos destacaram-se no processo de movimentação quase que contínuo das dunas transgressivas estudadas. A movimentação eólica transgressiva é mais evidente na região sul (Província de Maputo), onde explosões de dunas eólicas não vegetadas e semi-vegetadas são comuns. O destaque do vento como fator principal corrobora os resultados de Yizhaq *et al.* (2008), Tsoar *et al.* (2009), Hain *et al.* (2012) e Castro (2001) em ambientes similares. Esses trabalhos concluíram que, a atuação persistente de ventos unidirecionais gera feições eólicas bem notáveis como as encontradas na costa sul de Moçambique, África.

As taxas de transporte eólico e movimentação de dunas são evidenciadas através de feições caracterizadas por dunas transgressivas que se projetam em direção ao interior, soterrando a vegetação litorânea, promovendo o assoreamento de lagos e lagunas de retaguarda. Eventualmente provocam também a interrupção desses corpos lacustres em conexão com o mar aberto. Essas constatações corroboram trabalhos realizados por Miguel & Castro (2017) na mesma região, Castro (2001) e Castro *et al.* (2017) no litoral setentrional do nordeste brasileiro e Benallack *et al.* (2016), Gomes *et al.* (2017) e De Lecea *et al.* (2017) no litoral

sudeste africano. Esses trabalhos concluíram por unanimidade que projeções de feições eólicas desse tipo são principais responsáveis pelo assoreamento de sistemas lacustres ou lagunares de retaguarda e, por vezes soterrando sistemas de manguezais e habitações ou rodovias nas zonas costeiras.

O processo de assoreamento e soterramento intenso verificado nos corpos lacustres e lagunares da área de estudo, conforme índice de mobilidade das dunas proposto Lancaster (1988), foi estimado entre 50 e 200. Esses valores corroboram índices estimados também por Lancaster para dunas semi-ativas no sul da África. Esse intervalo de classificação estabelece uma diversidade de tipos de feições eólicas conforme observado na área de estudo, e por Tsoar *et al.* (2009) e Castro *et al.* (2017) no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. Por outro lado, Miguel e Castro (2017) encontraram uma correlação exponencial de índice de mobilidade dessas dunas com a precipitação pluviométrica de cerca de 91%. Esse índice de significância entre a mobilidade e precipitação pluviométrica reflete a dinâmica sazonal do transporte de sedimentos eólicos nos cordões holocênicos estudados. O resultado da taxa de movimentação médio de 23,0 m/ano encontrado nesse trabalho é superior a movimentação de 11,0 m/ano encontrada por Castro (2001), 17.5 m/ano por Jimenez *et al.* (2009) no litoral do Estado do Ceará, Brasil. Apesar da existência da possibilidade de análise de outras correlações de movimentação e atividade eólica com a precipitação ou mobilidade, observou-se que suas dependências são muito fracas, com valores inferiores a 10%. Ou seja, não contribuem diretamente na movimentação de

sedimentos eólicos do sistema estuado (Miguel & Castro, 2017).

Com base na classificação de potencial de deriva proposta por Fryberger (1979), o sistema eólico estudado, enquadra-se na faixa de deriva intermediária. Nessa escala, o regime de vento é um forte indicador de aceleração do processo de progradação das dunas transgressivas em ambientes costeiros (Tsoar *et al.* 2009; Castro *et al.*, 2017). A progradação das dunas foi interpretada através do modelo analítico proposto por Yizhaq *et al.* (2008) com três faixas de classificação. Com base nesse modelo, as dunas transgressivas do sul de Moçambique, integram-se nas faixas fixas e fixas-ativas (Figura 4). Nessas faixas são observadas dunas móveis, semi-fixas e fixas conforme intensidade de ventos e disponibilidade de sedimentos.

O grau de eficácia do modelo foi confirmado com observações de campo nos dois blocos sul e norte definidos na Figura 1. Observou-se dunas ativas e semi-vegetadas do extremo norte da Província de Maputo e dunas semi-vegetadas e fixas do extremo sul da província de Gaza, Moçambique. Essas feições morfológicas e o volume eólico observado na região são comuns em regiões onde a taxa de suprimento de sedimentos é superior aos níveis de sobre-elevação do mar, ou em sistemas barreiras que acompanham margens costeiras passivas (Dillemburg & Hesp, 2009). Esses autores definem as feições eólicas transgressivas nesses ambientes costeiros, como características morfológicas das costas com baixa declividade e dominadas por ondas. A combinação da disponibilidade de sedimentos em abundância na

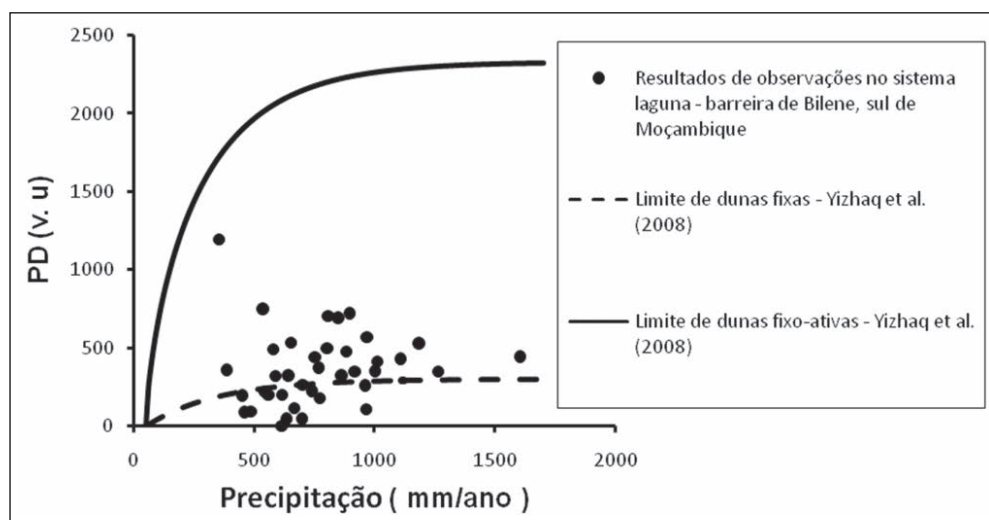


Figura 4 Classificação da dinâmica sedimentar das dunas transgressivas da costa sul de Moçambique.

costa sul de Moçambique e a existência de condições de clima de ondas de tempestade, de moderado a forte, favorece o desenvolvimento de duna-barreiras.

A disponibilidade de sedimentos soltos ou parcialmente vegetados nas dunas-barreiras formadas, propicia o transporte eólico por ação de cisalhamento do vento, formando em muitos casos, feições de dunas parabólicas ou transversais móveis no sistema laguna-barreira estudado. Essas observações corroboram com (Pye, 1983), que observou maiores formações de dunas costeiras localizadas em costas expostas a ventos litorâneos fortes, dominantes pelo menos em um período do ano, com disponibilidade de grandes depósitos de sedimentos bem selecionados por ação de ondas ou marés.

Os depósitos eólicos resultantes denotam um fornecimento de sedimentos de alto a moderado, refletindo-se na geração do campo de dunas transgressivas que prograda para o interior. Também é evidente a formação de uma planície de deflação contra a direção do vento, a mesma identificada por Hesp (2013) em depósitos similares. Sua evolução depende apenas das dunas frontais que migram continuamente para o interior formando diversas feições morfológicas que incluem, uma extensa planície de deflação, dunas coppice, cordões arenosos, depressões secas, pistas de cordões arenosos, e dunas parabólicas. Essas feições eólicas ativas são posteriormente de forma eventual, estabilizar-se completamente com vegetação ou presença de barreiras ou corpos lacustres.

O clima úmido da região favorece a ocorrência de chuvas intensas (Miguel *et al.*, 2001b). Apesar da disponibilidade de sedimentos soltos na planície de deflação da praia, a ausência sazonal de ventos fortes entre fevereiro e maio, impossibilita sobremaneira o transporte eólico. Essas condições possibilitam o desenvolvimento de vegetação sobre os depósitos eólicos, inibindo com certa magnitude, o efeito da energia do vento sobre a praia ou pois praia.

A precipitação média de 850 mm/ano encontrada nesse trabalho é relativamente significativa. Favorece considerável colonização da vegetação em cerca de ~70% da área de estudo, propiciando a estabilização de paleodunas de retaguarda e dunas atuais, principalmente no segmento norte da Província de Gaza. Por outro lado, o alto índice de evaporação de 1100 mm/ano no período seco (Været *et al.*, 2011), condiciona a

alta mobilidade eólica, gerando intenso processo de soterramento dos corpos lacustres. Esse processo também foi identificado por Castro (2005) no litoral setentrional do nordeste brasileiro nas mesmas condições meteorológicas e Hesp *et al.* (2013) nas dunas em diferentes regiões costeiras do mundo.

Observou-se que a precipitação pluviométrica diminuiu a mobilidade das dunas nos períodos chuvosos em função do aumento significativo da umidade na superfície das dunas. Efeitos típicos foram relatados em outros sistemas transicionais costeiros com características similares (Pye, 1993; Castro, 2005; Silva *et al.*, 2008; Yizhaq *et al.*, 2008; Tsoar, 2013; Yizhaq *et al.*, 2013). Esses trabalhos destacam o papel da precipitação pluviométrica como um fator climático principal que induz a desaceleração de transporte de sedimentos em períodos chuvosos. Esses períodos sazonais de índices pluviométricos intensos aumentam os níveis de lençóis freáticos e, eventualmente condicionam o desenvolvimento de vegetação sobre cordões eólicos. Lancaster (1988) e Tsoar *et al.* (2009) constaram que a vegetação desenvolvida não é essencial para a formação das dunas costeiras, porém é um fator controlador da morfologia das feições das dunas.

Por outro lado, a formação de dunas transgressivas dessa região pode estar associada a ocorrência de dipolos de anomalias de temperatura entre o oceano e atmosfera no Oceano Índico. Essa interação oceano-atmosfera condicionou a ocorrência episódica de fenômenos ENSO que foram confirmados por Kumar *et al.* (2014) no sudeste da África, Humphries *et al.* (2016) no estuário de Santa Lúcia na África do Sul. Ash e Wasson (1983), Castro (2001), Castro *et al.* (2017), Yizhaq *et al.* (2013), Tsoar *et al.* (2013) sugerem que a ocorrência desse episódio acarreta a aceleração do transporte de sedimentos eólicos e posterior movimentação intensa de dunas. Anomalias ENSO são relevantes para o transporte de sedimento eólico e movimentação de campos de dunas em áreas submetidas a secas intensas. Quando as secas são associadas a fortes anomalias ENSO, verifica-se maior movimentação de dunas em determinadas regiões do planeta, como é o caso do litoral do nordeste brasileiro (Castro *et al.*, 2017; Maia *et al.*, 2005). Em outros locais, esse episódio associa-se a altos registros pluviométricos, promovendo a desaceleração do movimento das dunas (Hastenrath, 2006).

5 Conclusões

Foram identificados dois segmentos de dunas transgressivas na costa sul de Moçambique. O primeiro, insere-se no extremo sul encontrado na Província de Maputo. Caracteriza-se por dunas ativas (móveis) e semi-vegetadas que soterram o sistema lacustre de retaguarda. O segundo, corresponde aos depósitos eólicos do extremo norte encontrados na província de Gaza, representado por dunas fixas (vegetadas) e semi-vegetadas, posicionadas frontalmente ao sistema lagunar.

A estimativa total de taxa de transporte de sedimento eólico para todos os quadrantes de direções de ventos demonstrou capacidade de transporte de 1,4 kg/m/s. O potencial de transporte eólico de 46 kg/m/s é o principal responsável pelo processo de assoreamento de todo o sistema lacustre-lagunar da costa sul de Moçambique. O volume do aporte de sedimentos estimado, também é o principal responsável pela colmatação de canais de ligação do sistema com o mar aberto.

O regime pluviométrico de cerca de 1600 mm/ano favorece a colonização da vegetação em aproximadamente 70% da área de estudo. Essas condições ambientais propiciaram a estabilização de grande parte do campo de dunas transgressivas, principalmente no segmento norte da área estudo. O alto índice de evaporação no período seco, acarreta maior mobilidade dos sedimentos eólicos nas áreas mais expostas a ventos intensos provenientes principalmente do SE.

Os modelos matemáticos utilizados nos cálculos de dinâmica sedimentar eólica, envolvendo o potencial de deriva eólica, índice de mobilidade eólica e o potencial de transporte de sedimento eólico médio, mostraram-se eficientes conforme dados fornecidos pelas estações meteorológicas de Maputo, Xai-Xai e NASA. O grau de eficácia pode ser confirmado pelas características morfológicas do campo de dunas ativas e semi-vegetadas da área sul (Província de Maputo) e das dunas semi-vegetadas e fixas da área norte (Província de Gaza) de Moçambique - África.

6 Agradecimentos

Agradecemos a CAPES junto ao Governo da República Federativa do Brasil pela bolsa de

doutorado desde 2015. Agradecemos a Universidade Eduardo Mondlane pela utilização do aparelho de localização do sistema de posicionamento geográfico-GPS. Agradecemos a senhora Sheila Machava pela ajuda nos trabalhos realizados no campo e monitoramento das taxas de avanço em Bilene na Província de Gaza, República de Moçambique, África.

7 Referências

- Armitage, S.J.; Botha, G.A.; Duller, G.A.T.; Wintle, A.G.; Rebêlo, L.P. & Momad, F.J. 2006. The formation and evolution of the barrier islands of Inhaca and Bazaruto, Mozambique. *Geomorphology*, 82(2006): 295-308.
- Ash, J.E. & Wasson, R.J. 1983. Vegetation and sand mobility in the Australian desert dunefield. *Z. Geomorphology*, 45: 7-25.
- Benallack, K.; Green, A.N.; Humphries, M.S.; Cooper, J.A.G.; Dladla, N.N. & Finch, J.M. 2016. The stratigraphic evolution of a large back-barrier lagoon system with a non-migrating barrier. *Marine Geology*, 379: 64-77.
- Botha, G.A.; Bristow, C.S.; Porat, N.; Duller, G.A.T.; Armitage, S.J.; Roberts, H.M.; Clarke, B.M.; Kota, M.W. & Schoeman, P. 2003. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa. In: Bristow, C.S., Jol, H.M. (Eds.), *Ground Penetrating Radar in Sediments: Special Publication-Geological Society of London*, 211: 29-46.
- Castro, J.W.A. 2001. *Geomorfologia do sistema sedimentar eólico de Paracuru-Ceará, Brasil*. Tese de Doutorado em Geomorfologia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 202p.
- Castro, J.W.A. 2005. Burying process carried out by a mobile transgressive dunefield, Paracuru County, State of Ceará, Brazil. *Environmental Geology*, 49(2005): 214-218.
- Castro, J.W.A.; Malta, J.V.; Miguel, L.L.A.J.; Cabral, C.L. & Pessamilio, A.B. 2017. Chronological reconstruction of eolianites and transversal mobile dunes of northwest coast of Ceará State - Brazil, in the last 3000 calyrs BP. *Aeolian Research*, 28(2017): 51-57.
- Cooper, J.A.G. & Pilkey, O.H. 2002. The Barrier Islands of Southern Mozambique. *Journal of Coastal Research*, 36: 164-172.
- De Lecea, A.M.; Green, A.N.; Strachan, K.L.; Cooper, J.A.G. & Wiles, E.A. 2017. Stepped Holocene sea-level rise and its influence on sedimentation in a large marine embayment: Maputo Bay, Mozambique. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 193(2017): 25-36.
- Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. 2009. Coastal barriers-an introduction. In: DILLENBURG, S.R., HESP, P.A. (Eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Lecture Notes in Earth Sciences, 107: 1-15.
- Fryberger, S.G. 1979. Dune forms and wind regime. In: MCKEE, E.D. (Ed.), *A Study of Global Sand Seas, US Geological Survey*, 1052: 137-169.
- Goldsmith, V. 1978. *Coastal Dunes*. Berlin, Springer-Verlag, 456p.
- Gomes, M.; Humphries, M.S.; Kirsten, K.L.; Green, A.N.;

- Finch, J.M. & De Lecea, A.M. 2017. Diatom-inferred hydrological changes and Holocene geomorphic transitioning of Africa's largest estuarine system, Lake St Lucia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 192: 170-180.
- Halo, I.; Backeberg, B.; Penven, P.; Ansoerge, I.; Reason, C. & Ullgren, J. 2014. Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. *Deep Sea Research II*, 100(2014): 38-53.
- Hastenrath, S. 2006. Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts. *Progress in Oceanography*, 70: 407-415.
- Hein, J.; Fitzgerald, D.M.; Cleary, W.J.; Albernaz, M.B.; De Menezes, J.T. & Klein, A.H.F., 2012. Evidence for a transgressive barrier within a regressive strand plain system: Implications for complex coastal response to environmental change. *Journal of Sedimentology* (2012). doi: 10.1111/j.1365-3091.2012.01348.x
- Hesp, P.A. & Walker, I.J. 2013. Coastal dunes. In: SHRODER, J., LANCASTER, N., SHERMAN, D.J., BAAS, A.C.W. (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. Aeolian Geomorphology, 11: 328-355.
- Humphries, M.S.; Green, A.N. & Finch, J.M. 2016. Evidence of El Niño driven desiccation cycles in a shallow estuarine lake: The evolution and fate of Africa's largest estuarine system, Lake St Lucia. *Global and Planetary Change*, 147(2016): 97-105.
- Jimenez, J.A.; Maia, L.P.; Serra, J. & Morais, J., 1999. Aeolian dune migration along the Ceará coast, North-eastern Brazil. *Sedimentology*, 46: 689-701.
- Kumar, P.S.; Pillai, G.N. & Manjusha, U. 2014. El Niño Southern Oscillation (ENSO) impact on tuna fisheries in Indian Ocean. *Springer Open Journal*, 2014: 3-591.
- Lancaster, N. 1988. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, southern Africa. *Journal of Arid Environments*, 14: 233-244.
- Langa, J.V.Q. 2007. Problemas na zona costeira de Moçambique com ênfase para a costa de Maputo. Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 7(1): 33-44.
- Lettau, H. & Lettau, H.H. 1978. Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration, IES Report 101. In: LEATTAU, H.H., LETTAU, K. (Eds.), *Exploring the World's Driest Climate*. Madison, University of Wisconsin, p. 110-147.
- Maia, L.P.; Freire, G.S.S. & Lacerda, L.D. 2005. Accelerated dune migration and aeolian transport during El Niño events along the NE Brazilian coast. *Journal of Coastal Research*, 21: 1121-1126.
- Miguel, L.L.A.J. & Castro, J.W.A., no prelo. Evolução geomorfologia do sistema laguna-barreira da costa sul de Moçambique: Padrões climáticos e dinâmica sedimentar. *Revista Brasileira de Geomorfologia*.
- Miguel, L.L.A.J.; Castro, J.W.A. & Nehama, F.P.J. 2017a. A mecânica de transporte de sedimentos em suspensão no rio de Macuse, Moçambique, África Oriental. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(1): 108-123.
- Miguel, L.L.A.J.; Castro, J.W.A. & Nehama, F.P.J. 2017b. Tidal impact on suspended sediments in the Macuse estuary in Mozambique. *Regional Studies in Marine Sciences*, 16(2017): 1-14.
- Miguel, L.L.A.J. & Castro, J.W.A. 2018. Evolução geomorfologia do sistema laguna-barreira da costa sul de Moçambique: Padrões climáticos e dinâmica sedimentar. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(1): 75-91.
- Moore, A.E.; Cotterill, F.P.D.; Main, M.P.L. & Williams, H.B. 2008. The Zambezi River. In: Gupta, A. (Ed.), *Large Rivers: Geomorphology and Management*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. doi: 10.1002/9780470723722.ch15
- Perry, C.T. 2004. Structure and development of detrital reef deposits in turbid nearshore environments, Inhaca Island, Mozambique. *Marine Geology*, 214(2005): 143-161.
- Pilkey, O.H.; Cooper, J.A.G. & Lewis, D.A. 2009. Global Distribution and Geomorphology of Fetch-Limited Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 25(4): 819-837.
- Pye, K. 1993. Late Quaternary development of coastal parabolic megadune complexes in northeastern Australia. In: PYE, K., LANCASTER, N. (Eds.), *Aeolian Sediments: Ancient and Modern*, Special Publication 16, Oxford, International Association of Sedimentologists, p. 23-44.
- Ramsay, P.J. & Cooper, J.A.G. 2002. Late Quaternary sea level changes in Southern Africa. *Quaternary Research*, 57: 82-90.
- Ramsay, P.J. 1995. 9000 years of sea level change along the southern african coastline. Joint Geological Survey, Marine Geoscience Unit, University of Natal, Durban 4001 South Africa. *Quaternary International*, 31: 71-75.
- Sauermann, G.; Andrade Jr. J.S.; Maia, L.P.; Costa, U.M.S.; Araujo, A.D. & Herrmann, H.J. 2003. Wind velocity and sand transport on a barchan dune. *Geomorphology*, 54(2003): 245-255.
- Siesser, W.G. 1974. Relict and Recent Beachrock from Southern Africa. *Geological Society of America Bulletin*, 85: 1849-1854.
- Silva, G.M.; Hesp, P.; Peixoto, J. & Dillenburg, S.R. 2008. Fore-dune vegetation patterns and alongshore environmental gradients: Moçambique Beach, Santa Catarina Island, Brazil. *Earth Surface, Processes and Landforms*, 33: 1557-1573.
- Tsoar, H. 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. Department of Geography and Environmental Development, Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva 84105, Israel. *Physica A*, 357(2005): 50-56.
- Tsoar, H. 2013. Critical environments: sand dunes and climate change. In: SHRODER, F.; LANCASTER, N.; SHERMAN, D.J. & BAAS, A.C.W. (Eds.), *Aeolian Geomorphology*, San Diego, Academic Press, 11: 414-427.
- Tsoar, T.; Levin, N.; Porat, N.; Maia, L.P.; Herrmann, H.J.; Tatum, 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.
- Været, L.; Leijnse, A.; Cuamba, F. & Haldorsen, S. 2011. Holocene dynamics of the salt-fresh groundwater interface under a sand island, Inhaca, Mozambique. *Quaternary International*, 2011: 1-9.
- Waelbroeck, C.; Labeyrie, L.; Michel, E.; Duplessy, J.C.; Mcmanus, J.F.; Lambeck, K.; Balbon, E. & Labracherie, M., 2002. Sea-level and deep-water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21 (2002): 295-305.
- Yizhaq, H.; Ashkenazy, Y. & Tsoar, H. 2008. Sand dune dynamics and climate change: A modelling approach. *Journal of Geophysical Research*, 114: 1-10.
- Yizhaq, H.; Ashkenazy, Y.; Levin, N. & Tsoar, H. 2013. Spatiotemporal model for the progression of transgressive dunes. *Physica A*, 392(2013): 4502-4515.