MORFOLOGIA E GÊNESE DAS DUNAS FRONTAIS DO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ

RODOLFO J. ANGULO*

ABSTRACT FOREDUNE MORPHOLOGY AND GENESIS ON THE STATE OF PARANÁ. Morphologic aspects along with textural and sedimentary structures of dune ridges that occur or existed until they were destroyed by urban occupation along the coastal plain of state of Parana (Brazil) were analyzed. Wind patterns and rainfall records in the area were also described in order to understand the origin and evolution of the dune ridges. Some variables that may have conditioned dune evolution are also discussed, allowing to conclude that all dune ridges have been formed close to the coast line from frontal dunes, with the help of vegetation and that there was no significant migration. Different degrees in development of these ridges are believed to be owed to changes in the variables that are the cause of their evolution, mainly climatic changes and velocity in sea level changes. Morphological differences are credited to changes in climatic conditions that occurred as dune ridges were formed. One may also ask if there really existed the process of dune "dissipation".

Keywords: Foredune, dune ridges, foredune genesis, State of Paraná Coastal Plain, dune dissipation.

RESUMO Neste trabalho, analisam-se a morfologia, as características texturais e as estruturas sedimentares dos cordões dunares que existem ou existiram, até serem destruídos pela ocupação urbana, ao longo do litoral paranaense e descrevem-se as características dos ventos e precipitações na área, com o objetivo de compreender a origem e evolução dos cordões dunares. São discutidas quais as variáveis que influenciam a evolução das dunas, concluindo-se que todos os cordões dunares formaram-se junto à linha de costa, a partir de dunas frontais, com o auxílio da vegetação e que não houve migração significativa das dunas. O diferente grau de desenvolvimento dos cordões foi atribuído a mudanças nas variáveis que comandaram sua evolução, principalmente climáticas, e à velocidade das variações relativas do nível do mar. As diferenças morfológicas foram atribuídas a variações nas condições climáticas ocorridas durante a formação dos cordões. Questiona-se, também, a existência do processo de "dissipação" de dunas.

Palavras-chave: Dunas frontais, cordões dunares, gênese de dunas frontais, planície costeira do Estado do Paraná, dissipação de dunas.

INTRODUÇÃO O litoral do Estado do Paraná possui uma ampla planície costeira que se estende desde o Canal do Varadouro, ao norte, no limite com o Estado de São Paulo, até o Rio Sai-Guaçu, ao sul, no limite com o Estado de Santa Catarina (Fig. 1). Sua largura pode atingir 55 km, como na latitude de Paranaguá. A planície costeira raramente ultrapassa a cota de 10 m acima do nível médio do mar, havendo uma diminuição progressiva de altitude, do interior em direção ao mar. Esta tendência é interrompida onde existem dunas eólicas sobrepostas.

A planície é formada por sedimentos continentais e costeiros de idade cenozóica e principalmente quaternária. Os sedimentos costeiros foram depositados em dois sistemas deposicionais: o de planície costeira com cordões litorâneos (*strand-plain*) e o estuarino. O sistema de planície com cordões inclui principalmente sedimentos de face litorânea (*shoreface*), praia e dunas frontais (Angulo 1992), depositados durante as fases regressivas ocorridas após os máximos das transgressões Cananéia e Santos, no Pleistocene Superior e Holoceno (Martin & Suguio 1986, Martin *et al.* 1988).

Em seu trabalho pioneiro sobre o litoral paranaense, Bigarella (1946) descreveu características morfológicas e texturais das dunas costeiras. Posteriormente, Bigarella (1965) acrescentou informações sobre a morfologia dos cordões dunares. O primeiro trabalho específico sobre as dunas costeiras do Paraná foi o de Bigarella *et al.* (1969b), no qual se deu ênfase às estruturas sedimentares. Em outros trabalhos foram acrescentadas novas informações, principalmente sobre estruturas, texturas e gênese das dunas (Bigarella *et al.* 1969a, 1970/71, 1978, Bigarella 1972).

Embora existam diversos trabalhos que se referem às dunas costeiras que ocorrem no Paraná, as descrições morfoló-

gicas dos cordões, principalmente em planta, são escassas. Um dos objetivos deste trabalho é caracterizar a morfologia desses cordões. Objetiva-se também contribuir na compreensão de sua gênese, considerando aspectos climáticos, sedimentológicos e morfológicos, e discutir alguns aspectos de sua evolução propostos em trabalhos prévios.

DISTRIBUIÇÃO E MORFOLOGIA A análise morfológica dos depósitos eólicos foi realizada no campo e, principalmente, por meio de fotografias aéreas antigas, pois o processo de urbanização do litoral já destruiu grande parte deles, notadamente no litoral sul, entre Pontal do Sul e o Rio Sai-Guaçu, onde eram mais desenvolvidos. Foram utilizadas fotografias aéreas na escala 1:25.000, referentes aos anos de 1952 a 1955 e ao de 1980. Para alguns setores da costa empregaram-se fotografias aéreas 1:40.000, de 1969, e mapas topográficas 1:10.000.

No Paraná, os sedimentos eólicos, apesar de não desenvolverem grandes feições, ocorrem sob diversas formas ao longo de praticamente toda a costa. Originam cordões paralelos à linha de costa, os quais, às vezes, podem ser seguidos por mais de 15 km. A largura dessas feições varia entre 20 e 80 m, podendo alcançar mais de 250 m. A altura raramente ultrapassa 6 m sobre o nível da planície, sendo mais frequentes alturas de 3 a 5 m. Uma exceção são as dunas existentes na Ilha do Mel, entre os morros Bento Alves e do Meio, que construídas sobre um terraço de aproximadamente 6 m de altura, atingem altitudes de mais de 20 m sobre o nível do mar (Fig. 2).

Os cordões maiores ocorrem em número variável de um a três. Entre Praia de Leste e Pontal do Sul, nos locais onde foram preservados, observa-se um cordão interno maior, com

* Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19011, CEP 81531-970, Curitiba, PR, Brasil

Figura 1 - Localização da planície costeira do Estado do Paraná

Figure 1 - Location of State of Paraná coastal plain

uma altura de 3 a 6 m sobre o nível da planície (Figs. 3 e 4). Sua largura média está em torno de 80 m. No sentido longitudinal, o cordão é retilíneo, ou com curvas suaves, e apresenta uma sucessão de cristas e depressões, ocorrendo concavidades voltadas para barlavento. Esse cordão foi referido como "cordão mais antigo", por Bigarella *et al.* (1969b). A cobertura vegetal é densa, constituída por árvores de porte médio e arbustos. Bigarella *et al.* (1969b) fazem referência aos gêneros *Pisidium*, *Pithicolobium*, *Dodoneas* e *Erythrexylon*, entre as árvores que compõem a vegetação.

O cordão seguinte, em direção ao mar, é mais baixo que o anterior, com altura predominante de 3 a 4 m. No sentido longitudinal, a forma do cordão é mais sinuosa, apresentando freqüentes concavidades voltadas para barlavento e, em vários locais, ele está interrompido. A vegetação é menos desenvolvida e densa que no cordão anterior, distribuindo-se de forma descontínua. Na face de sotavento ocorrem pequenas árvores e arbustos, formando uma cobertura contínua. Na face de barlavento, ao contrário, existem áreas com vegetação arbustiva e herbácea rala e até ausente. As concavidades

Figura 3 - Mapa hipsométrico da faixa costeira próxima do Jardim São Pedro, PR. 1. Direção do vento predominante inferido a partir da morfologia das dunas; 2. Caminho. (Base cartográfica: SEPL-PR 1983)

Figure 3 - Hypsometric map of coastal plain near Jardim São Pedro, State of Parana, Brazil. 1. Prevailing wind direction inferred from dune morphology, 2. Track.

uma média de 2,630. A fração predominante em todas as amostras foi 0,125-0,250 mm (3,0 - 2,0Ø). Em todos os casos, 70% a 90% dos grãos pertenciam à classe modal. Constataram que o diâmetro médio da areia das dunas, da mesma forma que o das praias, diminuía da parte central da costa (Praia de Leste) em direção ao nordeste (Pontal do Sul) e

sudoeste (Matinhos). Em outro trabalho na mesma área, Bigarella *et al.* (1969b) verificaram que todas as amostras de sedimentos eólicos correspondiam à areia fina com um diâmetro médio de 0,173 mm (2,5Ø) sendo que as dunas localizadas ao norte da Praia de Leste apresentaram uma média de 0,153 mm (2,7Ø), e, as situadas ao sul, uma média de 0,196

Figura 4 - Mapa hipsométrico da faixa costeira entre Guarapari e Ipanema, PR. 1. Direção do vento prevalecente inferido a partir da morfologia das dunas (Base cartográfica: SEPL-PR 1983)

Figure 4 - Hypsometric map of coastal plain between Guarapari and Ipanema, State of Parana, Brazil. 1. Prevailing wind direction inferred from dune morphology (cartographic base: SEPL-PR 1983)

mm (2,3Ø). As areias eram bem selecionadas e com assimetria predominantemente negativa.

As estruturas sedimentares foram descritas em detalhe por Bigarella *et al.* (1969b, 1970/71). Em 1969, os autores de-

terminaram as direções de mergulho dos estratos das dunas do Jardim São Pedro, encontrando uma direção média de N43 W, com uma dispersão maior que 180° (S27W até N48E). Mais ao sul, encontraram direções médias de mergulho de

Figura 5 - Perfil topográfico em Praia de Leste, onde se observam vários cordões dunares (Bigarella et al. 1978)

Figure 5 - Topographic profile at Praia de Leste, State of Paraná, Brazil, with several dune ridges (Bigarella et al. 1978)

N28W, em Guarimar, e de N70W em Porto Novo, sendo que a dispersão dos vetores foi de 75° (N16W até S89W). Com relação aos cordões embrionários, Bigarella et al. (1969b) descrevem estruturas internas de pequenas dunas dômicas (antedunas). Encontraram um tipo de estratificação que, segundo os autores, poderia ser exclusiva desse tipo de dunas: camadas convexas acompanhando a forma externa. Bigarella et al. (1970/71) descreveram, detalhadamente, as estruturas de dois cordões praias-dunares, mostrando sua origem complexa de cristas praias e cordões dunares incipientes recobertos por depósitos eólicos (Fig.6c). Outro aspecto im-

portante da estrutura das dunas é a ocorrência de paleossolos (Bigarella et al. 1969b).

CLASSIFICAÇÃO Os sedimentos eólicos que ocorrem na costa do Paraná próximos ao litoral, constituem feições que podem ser denominadas, genericamente, de cordões dunares costeiros, identificando-se assim sua configuração linear, sua origem eólica e sua relação geográfica e genética com a costa. No Paraná, os cordões costeiros podem ser agrupados em dois tipos principais: os desenvolvidos e os incipientes ou embrionários, podendo ocorrer formas transicionais.

Foto 1 - Cordão dunar incipiente com dunas linguóides. Superagüi, PR

Photo 1 - Incipient dune ridge with linguoid dunes. Superagüi, State of Paraná

Foto 2 - Cordões dunares incipientes com dunas dômicas. Ilha do Mel, PR

Photo 2 - Incipient dune ridges with pro-dunes. Mel Island. State of Paraná

Foto 3 - Cordão dunar incipiente parcialmente erodido por ondas de tempestade. Pontal do Sul, PR

Photo 3 - Incipient dune ridge partially eroded by storm waves. Pontal do Sul, State of Paraná

Figura 6 - Perfis transversais à linha de costa de: **a.** duna dômica, Ipanema, PR; **b.** cordão dunar incipiente parcialmente erodido por ondas de tempestade, Caiobá, PR; **c.** cordão dunar formado por vários cordões incipientes recobertos por areias eólicas, Guarimar, PR. 1. Sedimentos eólicos (Modificado de Bigarella et al. 1970/71)

Figure 6 - Transversal profile to shore line of: **a.** pro-dune, Ipanema, State of Paraná; **b.** incipient dune ridge eroded by storm waves, Caiobá, State of Paraná; **c.** dune ridge formed by several incipient dune ridges covered by eolian sands, Guarimar, State of Paraná. 1. Eolian sediments (adapted from Bigarella et al. 1970/71)

Os cordões desenvolvidos foram denominados sucessivamente de *main dune ridge* e *dune ridge* (Bigarella et al. 1969b), cordão de dunas de precipitação (*precipitation ridge dune*) (Bigarella et al. 1970/71, Bigarella 1972), e dunas de retenção (Bigarella et al. 1978). Esses cordões podem ser incluídos na categoria de dunas vegetadas da classificação de Goldsmith (1979) e seriam equivalentes às dunas frontais estabelecidas (*established foredunes*), descritas por Hesp (1988), no sudeste australiano, e às dunas frontais vegetadas, estudadas por Tomazelli (1990) na planície costeira do Rio Grande do Sul.

Os cordões incipientes são feições de menor altura, tendo sido observados vários tipos. Alguns são formados pela coalescência de pequenas dunas linguóides ou dômicas. Outros são cordões estreitos, com dunas sem forma definida. Em alguns casos, os cordões incipientes possuem uma forma assimétrica, com o lado de barlavento mais íngreme, resultante de erosão parcial do cordão pelas ondas de tempestade. Às vezes, vários desses cordões são cobertos por areias eólicas, formando uma feição mais larga de perfil suavemente convexo. Os cordões incipientes foram sucessivamente denominados de *beach ridge dune* (Bigarella et al. 1969), de *beach-dune ridge* (Bigarella et al. 1970/71, Bigarella 1972) e de cordão praiar-dunar (Bigarella et al. 1978). Poderiam ser incluídos na categoria de dunas vegetadas incipientes (*incipient vegetated dunes*) de Goldsmith (1979), e corresponderiam às dunas frontais incipientes (*incipient foredune*) de Hesp (1988) e às dunas embrionárias vegetadas de Tomazelli (1990).

VENTOS E PRECIPITAÇÕES A dinâmica dos ventos no litoral paranaense é definida, basicamente, pelo Anticiclone do Atlântico Sul e pelo Anticiclone Migratório Po-

Figura 7 - Cordões dunares incipientes. Barra do Saí, PR. 1. Cordões dunares. 2. Praia

Figure 7 - Incipient dune ridges. Barra do Saí, State of Paraná. 1. Dune ridges. 2. Beach

lar, na sua ação sobre o Ramo Atlântico da Massa Polar (Bigarella *et al.* 1978).

As medições de ventos no litoral paranaense são escassas. A estação meteorológica de Pontal do Sul, pelo fato de estar localizada na costa, fornece os dados mais aproximados ao que ocorre na orla litorânea. Os dados disponíveis referem-se ao período que vai de setembro de 1982 a dezembro de 1986, com uma interrupção nos meses de junho, julho e agosto de 1984 (PORTOBRÁS 1988). Esses dados revelam que os ventos predominantes provêm de leste e sul, com frequências para o período de 9,5% e 9,3%, respectivamente (Tab. 2).

Quando se analisam as frequências por faixa de velocidade, observa-se que a dominância dos ventos provenientes de leste diminui rapidamente para ventos mais fortes. Os ventos com velocidades superiores a 6 m/s representam 16,0% do total das medições (Tab. 3). Destes, os provenientes do sul correspondem a 20,4% e os do leste a 17,4%. Os ventos com essas velocidades se concentram nas direções E-ENE (31,9%) e SSW-SSE (43,6%) e quase não ocorrem nas direções provenientes do continente (Fig. 8). A predominância dos ventos provenientes do SE-SSE aumenta quando se consideram as velocidades maiores de 8 m/s e 10 m/s. Nesse

Tabela 2 - Frequência, velocidade e direção dos ventos em Pontal do Sul no período de setembro de 1982 a dezembro de 1986, exceto junho, julho e agosto de 1984 (Fonte dos dados: PORTOBRÁS 1988)

Table 2 - Wind frequency, velocity and direction in Pontal do Sul Period September 1982 to December 1986, except June, July and August 1984 (Source: PORTOBRÁS 1988)

DIREÇÃO DOS VENTOS	FREQUÊNCIA DOS VENTOS P/ FAIXA DE VELOCIDADE (%)					
	VELOCIDADE (m/s)					
	0-14	> 4	> 6	> 8	> 10	12-14
N	6,8	1,2	0,6	0,4	-	-
NNE	5,2	1,4	0,7	0,1	0,2	-
NE	5,4	4,2	3,5	2,0	1,2	-
ENE	7,8	12,3	14,5	12,3	5,2	2,0
E	9,5	15,9	17,4	11,5	2,9	-
ESE	7,9	12,3	8,2	3,2	1,9	-
SE	6,9	9,9	7,4	6,1	5,0	6,0
SSE	7,7	11,9	14,1	19,6	24,2	25,5
S	9,3	15,0	20,4	31,0	57,0	49,0
SSW	6,3	8,7	9,1	10,5	8,6	15,7
SW	4,6	4,2	2,6	2,2	0,5	-
WSW	4,4	1,0	0,3	0,1	-	-
W	5,9	0,4	0,2	0,1	0,2	-
WNW	5,3	0,4	0,4	0,3	1,0	-
NW	3,8	0,6	0,3	0,2	0,2	2,0
NNW	3,2	0,6	0,3	0,7	1,7	-
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Tabela 3 - Frequência e velocidade dos ventos em Pontal do Sul no período de setembro de 1982 a dezembro de 1986, exceto junho, julho e agosto de 1984 (Fontes dos dados: PORTOBRÁS 1988)

Table 3 - Wind frequency and velocity in Pontal do Sul. Period: September 1982 to December 1986, except June, July and August 1984 (Source: PORTOBRÁS 1988)

FREQUÊNCIA DOS VENTOS	VELOCIDADE DOS VENTOS (m/s)					
	0 a 14	> 4	> 6	> 8	> 10	12-14
nº	32.232	11.933	5.072	1.575	421	51
%	100,00	37,03	15,74	4,89	1,31	0,16

Figura 8 - Frequência e direção dos ventos em Pontal do Sul no período de setembro de 1982 a dezembro de 1986. **a.** geral; **b.** ventos com velocidade superior a 6 m/s; **c.** velocidade superior a 8 m/s; **d.** velocidade superior a 10 m/s. (Fonte dos Dados: PORTOBRÁS 1988)

Figure 8 - Wind frequency and direction at Pontal do Sul from September 1982 to December 1986. **a.** general; **b.** wind velocity higher than 6 m/s; **c.** wind velocity higher than 8 m/s; **d.** wind velocity higher than 10 m/s (Source: PORTOBRÁS 1988)

último caso, praticamente todas as medições correspondem às direções sul e sul-sudeste.

Analisando-se a sazonalidade da velocidade e frequência dos ventos nas direções predominantes nos três anos com registro completo (1983, 1985, 1986), observa-se que os ventos com velocidades superiores a 6 m/s se concentram na primavera (37,4%) e no verão (31,6%). Quando se consideram os ventos mais fortes, com velocidades superiores a 12 m/s, a concentração é maior, alcançando 72,7% na primavera e 22,7% no verão (Tab. 4).

As chuvas que caem no litoral paranaense são dos tipos ciclônico, orográfico e de convecção (IPARDES 1990). Na planície costeira, a média anual, no período de 1975-84, foi de 2.478 mm, sendo o verão a estação mais chuvosa e o inverno a menos chuvosa. Nos postos meteorológicos mais próximos da orla marítima, a média anual foi de 2.068 mm em Ipanema e de 2.401 mm em Guaratuba (IPARDES 1990).

Os dados referentes ao período 1983-86 em Pontal do Sul apontam uma média anual de 1.731 mm. As estações mais chuvosas foram o verão (37,2% das precipitações) e o outono (29,7%); as estações com menos precipitações foram o inverno, com 13,8%, e a primavera, com 19,2% (Tab. 5) (PORTOBRÁS 1988).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES *Relação entre o Transporte de Areia, o Vento e a Precipitação* Fryberger

(1979) correlacionou a velocidade do vento necessária para iniciar o movimento de areia ao nível do solo (velocidade limiar) com a velocidade a 10 m de altura, que corresponde à altura a que geralmente é medida a velocidade do vento nas estações meteorológicas. Para uma areia com diâmetro médio de 0,30 mm (1,75 ϕ), constituída de grãos de quartzo, verificou que a velocidade do vento necessária para iniciar o transporte de areia no solo deve corresponder a uma leitura de 6 m/s a 10 m de altura.

Apesar da escassez dos dados, pode-se observar que, em Pontal do Sul, os ventos efetivos no transporte de areia são provenientes apenas de dois quadrantes, sul e leste.

Como o transporte de areia aumenta em relação cúbica com a velocidade do vento, os ventos mais fortes têm uma capacidade muito maior de transporte (Fryberger 1979). Considerando os ventos com velocidades superiores a 8 m/s, verifica-se que em Pontal do Sul apenas os ventos sul e sul-sudeste atingem essas velocidades, sendo provavelmente os que mais contribuem para a formação das dunas.

Comparando-se a sazonalidade dos ventos efetivos no transporte de areia com a das precipitações (Tab. 4 e 5), observa-se que durante a primavera ocorre uma precipitação relativamente baixa, associada a uma maior frequência de ventos com velocidade superior a 6 m/s. Verifica-se também que 72,7% dos ventos mais fortes, com velocidade superior a 12 m/s, ocorrem na primavera. Assim, pode-se considerar que provavelmente o maior transporte de areia deve ocorrer durante esta estação, quando os ventos com velocidades superiores a 6 m/s encontram uma maior disponibilidade de areia seca.

Gênese Os cordões dunares costeiros iniciam-se como pequenas acumulações de areia ao encontro das primeiras linhas de vegetação. A areia retirada da praia pode ser acumulada de encontro às escarpas de praia, elaboradas por ondas de tempestade, conforme observaram Bigarella *et al.* (1970/1971). As acumulações que constituem o cordão podem assumir formas de dunas linguóides ou dômicas ou ainda não apresentar forma definida. Bigarella *et al.* (1969b, 1970/1971) salientaram que as dunas dômicas seriam instáveis, sendo erodidas antes de alcançar 1 m de altura.

Os cordões incipientes podem se formar em curtos períodos de tempo. Smith (1988) observou, na Costa do Ouro (Ghana, África Ocidental), que dunas incipientes, com altura inferior a 2 m, podem se formar em apenas um dia, já uma duna com 2 m não se formaria em um período inferior a seis meses. No Paraná, a modernidade dos cordões dunares incipientes pode ser constatada pela ocorrência frequente de lixo plástico na base das dunas e no seu interior, acompanhando a estratificação; também pode ser detectada pela comparação de fotografias aéreas. Onde houve progradação da costa, vários cordões incipientes se formaram nos últimos quarenta anos.

As ondas de tempestade frequentemente erodem os cordões incipientes. Quando a erosão é parcial, resulta num cordão assimétrico com o lado de barlavento mais íngreme. Como os cordões não são rigorosamente paralelos, pode ocorrer a eliminação de um ou mais cordões ao longo da costa. A feição erosiva impressa em cada cordão pode ter sido originada por uma única tempestade, e a diferença de orientação dos cordões poderia ser explicada pela variação na direção da frente de onda em cada tempestade.

Quando há aporte suficiente de sedimentos, as cristas praias ou os cordões incipientes podem ser recobertos por novos sedimentos eólicos, resultando um cordão mais largo, de perfil suavemente convexo, que conserva no seu interior as marcas erosivas das ondas de tempestade (Fig. 6c). Sobre esse amplo cordão podem se desenvolver formas menores, tais como dunas dômicas ou sem forma definida. Quando o aporte sedimentar é suficiente, o cordão incipiente pode crês-

Tabela 4 - Frequência sazonal dos ventos com velocidade superior a 6 m/s, nas direções predominantes, em Pontal do Sul, nos anos 1983/85/86 (Fonte dos dados: PORTOBRÁS 1988)

Table 4 - Seasonal wind frequency of winds with velocity higher than 6 m/s, for the dominant directions in Pontal do Sul for the years 1983/85/86 (Source: PORTOBRÁS 1988)

DIREÇÃO DOS VENTOS	Frequência dos ventos com velocidade superior a 6 m/s										Frequência dos ventos com velocidade superior a 6 m/s									
	Primavera		Verão		Outono		Inverno		Ano		Primavera		Verão		Outono		Inverno		Ano	
	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%
ENE	194	41,5	156	33,3	90	19,2	28	6,0	468	100,0	43	34,1	58	46,0	20	15,9	5	4,0	126	100,0
E	290	47,5	245	40,0	44	7,2	35	5,7	614	100,0	57	58,1	57	58,1	9	7,0	6	4,7	129	100,0
SSE	151	51,8	153	32,7	132	26,5	52	10,4	498	100,0	75	38,7	58	29,9	40	20,6	21	10,8	194	100,0
S	258	38,3	176	26,2	158	23,5	81	12,0	673	100,0	116	38,3	94	31,0	63	20,8	30	9,9	303	100,0
SSW	77	22,4	81	23,5	107	31,1	79	23,0	344	100,0	39	33,3	26	22,2	33	28,2	19	16,2	117	100,0
Somatório	970	37,4	821	31,6	531	20,4	275	10,6	2.597	100,0	330	33,3	293	33,7	165	18,9	81	9,3	869	100,0

DIREÇÃO DOS VENTOS	Frequência dos ventos com velocidade superior a 10 m/s										Frequência dos ventos com velocidade superior a 12 m/s									
	Primavera		Verão		Outono		Inverno		Ano		Primavera		Verão		Outono		Inverno		Ano	
	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%	n°	38,0	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%
ENE	1	8,3	11	91,7	-	-	-	-	12	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,0
E	1	11,1	8	88,9	-	-	-	-	9	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,0
SSE	25	48,1	12	23,1	6	11,5	9	17,3	52	100,0	5	83,3	1	16,7	-	-	-	-	6	100,0
S	44	37,6	44	37,6	15	12,8	14	12,0	117	100,0	7	63,6	3	27,3	1	9,1	-	-	11	100,0
SSW	12	44,4	6	22,2	4	14,8	5	18,5	27	100,0	4	80,0	1	20,0	-	-	-	-	5	100,0
Somatório	83	38,2	81	37,3	25	11,5	28	12,9	217	100,0	16	72,7	5	22,7	1	4,5	-	-	22	100,0

Tabela 5 - Precipitação sazonal em Pontal do Sul, no período de 1983-86 (Fonte dos dados: PORTOBRÁS 1988)

Table 5 - Seasonal rainfall in Pontal do Sul. Period: 1983-86 (Source: PORTOBRÁS 1988)

ESTAÇÃO DO ANO	PRECIPITAÇÃO									
	1983		1984		1985		1986		MÉDIA	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Verão	614,78	28,4	635,24	33,3	635,90	43,5	693,35	49,9	644,82	37,2
Outono	771,69	35,7	495,76	26,0	439,20	30,0	352,35	25,4	514,75	29,7
Inverno	426,06	19,7	312,45	16,4	81,03	5,5	133,60	9,6	238,29	13,8
Primavera	350,83	16,2	466,50	24,4	305,80	20,9	209,70	15,1	333,21	19,2
Ano	2.162,36	100,0	1.909,95	100,0	1.461,93	100,0	1.389,00	100,0	1.731,07	100,0

ceraté se tornar um cordão desenvolvido. Smith (1988) verificou, na Costa do Ouro, que um cordão de 4 m de altura levava, no mínimo, 5 a 6 anos para se formar. Pethick (1984) estima que um cordão desenvolvido pode demorar entre 70 e 200 anos.

No litoral paranaense, todos os cordões dunares acompanham a direção da linha de costa, variando sua orientação desde norte-sul até leste-oeste. O fato de serem rigorosamente paralelos à linha de costa e não à direção dos ventos efetivos dominantes evidencia que não migraram ou que tiveram

uma migração muito reduzida (Smith 1988). Assim, todos os cordões dunares devem ter-se desenvolvido com o auxílio efetivo da vegetação.

Os cordões incipientes possuem geralmente cobertura vegetal esparsa, constituída principalmente por *Sporobolus*. Este tipo de Vegetação com estolões tem um papel ativo na formação da duna, pois aumenta a rugosidade efetiva da superfície e, conseqüentemente, a espessura da camada de ar com velocidade zero, favorecendo a deposição de areia (Goldsmith 1979, Pethick 1984, Hesp 1988). Goldsmith

(1979) e Hesp (1983) observaram que a vegetação herbácea tem pouco efeito na perturbação da estratificação. No Paraná, nas dunas incipientes com *Sporobolus*, as estruturas sedimentares são visíveis até à superfície da duna, fato notado, também, por Bigarella *et al.* (1970/1971). Ao contrário, quando as dunas apresentam uma cobertura vegetal mais densa, constituída por árvores e arbustos, sempre ocorre, na parte superficial, uma camada pedogeneizada, sem estruturas visíveis. A espessura dessa camada pode variar de alguns centímetros a mais de 2 m, dependendo do porte da vegetação.

Todos os cordões dunares desenvolvidos no litoral apresentam estruturas internas, podendo-se inferir que evoluíram sob vegetação herbácea e, posteriormente, foram colonizados por outros tipos de vegetação. Se durante o processo de formação do cordão houve uma parada temporária, com o estabelecimento de vegetação arbustiva e/ou arbórea, esse fato deve figurar no registro sedimentar como um paleossolo, a exemplo dos descritos por Bigarella *et al.* (1970/1971). Os cordões desenvolvidos observados no Paraná são paralelos à linha de costa atual, independentemente de sua distância em relação a esta, evidenciando que não houve mudanças na configuração de costa durante a progradação.

Os cordões acompanham as mudanças de direção da linha de costa e sua orientação não está relacionada à direção dos ventos efetivos dominantes, o que evidencia que eles foram formados junto a linha de costa, sem sofrer migração. Uma outra evidência da não migração dos cordões dunares é a existência, entre estes, de feições lineares, semelhantes a cordões incipientes, as quais teriam sido obliteradas caso as dunas tivessem migrado sobre elas. Também, no extremo sul do litoral paulista, no esporão que se projeta da Ilha do Cardoso, nota-se que os cordões dunares se curvam para o interior, na proximidade da Barra do Ararapira. A mesma inflexão pode ser observada nos cordões mais antigos, evidenciando que estes foram se formando simultaneamente ao processo de crescimento longitudinal do esporão e permaneceram nessa posição sem migrarem posteriormente.

Como foi salientado por vários autores (Pethick 1984, Goldsmith 1979, Hesp 1983), é muito difícil a areia escapar da armadilha constituída pela vegetação. Assim, a maior parte da areia retirada da praia pelo vento fica retida no primeiro cordão dunar. É possível deduzir que os cordões se formaram junto à linha de praia e que seu crescimento diminuiu ou cessou com a progradação da costa e a formação de um novo cordão.

Em alguns casos, a vegetação se desenvolveu suficientemente para imobilizar o cordão. Em outros, ocorreu um certo grau de retrabalhamento da areia pelo vento, formando-se bacias de deflação (*blow-outs*) e protuberâncias linguóides que provocaram uma migração incipiente do cordão, que às vezes alcançou dezenas de metros.

Considerando a hipótese de que todos os cordões se formaram a partir de dunas frontais junto à linha de costa, a configuração atual dos mesmos indica uma costa em progradação, onde, em alguns momentos, há condições para a formação de cordões dunares desenvolvidos e, em outros momentos, apenas para a formação de cordões incipientes. Muitas são as variáveis que condicionam a formação de uma duna frontal:

- a. tipo de sedimento da área-fonte (praia), principalmente do tamanho das partículas e da seleção (Goldsmith 1979, Smith 1988);
- b. suprimento de sedimentos na área-fonte que, por sua vez, depende do regime de ondas e marés, da morfologia da costa, do gradiente da plataforma, das variações relativas do nível do mar, da composição da plataforma e do aporte fluvial (Goldsmith 1979, Smith 1988);
- c. regime de ventos, principalmente velocidade, direção e frequência (Fryberger 1979);

d. regime de precipitações (Goldsmith 1979);

e. tipo de vegetação (Goldsmith 1979, Hesp 1983);

f. morfologia da praia, principalmente topografia e largura (Smith 1988) (Fig. 9).

Em curtos períodos de tempo geológico (dezenas, centenas ou talvez milhares de anos), quais seriam as variáveis que poderiam mudar significativamente, para propiciar ou impedir a formação de um cordão dunar desenvolvido?

Como foi indicado, no setor da costa onde os cordões desenvolvidos estão melhor representados, o traçado da linha de costa foi semelhante durante a construção dos cordões. Também a composição sedimentar dos diferentes cordões parece não apresentar diferenças significativas (Bigarella *et al.* 1969a, 1969b, 1970/71). Duas parecem ser as variáveis mais prováveis que originaram essa configuração: as variações relativas do nível do mar e as variações ou oscilações climáticas, principalmente no regime de precipitações e ventos, sendo que estes poderiam também provocar mudanças no regime de ondas.

Uma estabilização temporária do nível relativo do mar proporcionaria tempo suficiente para a formação de um cordão dunar desenvolvido. Uma descida mais rápida propiciaria uma progradação maior e favoreceria a formação de cordões menores. Pequenas oscilações positivas do nível do mar poderiam favorecer a retomada da construção de um cordão dunar, a qual seria evidenciada pela existência de um paleossolo no interior do cordão. Porém, variações climáticas poderiam ter efeitos semelhantes na evolução das dunas. Períodos de vários anos, com ventos mais intensos e/ou mais frequentes, e períodos mais secos também proporcionariam a formação de cordões maiores. Não existem ainda dados suficientes que permitam esclarecer estas questões. Seria necessário conhecer com mais precisão a curva de variação do nível relativo do mar dos últimos 5.000 anos, no Paraná, e a idade dos cordões dunares, o que pode ser dificultado pela escassez de material datável nas dunas e de indicadores de paleoníveis marinhos suficientemente precisos.

A migração do cordão dunar geralmente tende a mudar sua forma. O cordão originalmente retilíneo pode começar a se dividir em setores que avançam com velocidades diferentes, pelo processo de acumulação-deflação de areias do próprio cordão. Formam-se trechos côncavos para barlavento, que consistem numa bacia de deflação e numa protuberância tinguóide. Progressivamente, vão se formando dunas parabólicas e pequenas dunas longitudinais, que correspondem a braços isolados das dunas parabólicas. Na sua passagem as dunas parabólicas deixam um relevo irregular, com pequenas elevações e depressões, onde não se verificam mais as feições lineares existentes antes de sua passagem. As dunas possuem sua forma orientada segundo a direção dos ventos mais efetivos. No Jardim São Pedro, as direções dos ventos mais efetivos inferidas da morfologia das dunas se ajustam com a direção de ventos predominantes com velocidade superior a 6 m/s - efetivos no transporte de areia - e com o mergulho da estratificação cruzada que, segundo Bigarella *et al.* (1978), indicou ventos provenientes do quadrante sudeste.

Pethick (1984) apresenta uma série de cordões, dos quais os mais novos são retilíneos e os mais antigos progressivamente mais complexos, com bacias de deflação e dunas em forma de U, até culminarem num cordão de dunas parabólicas. Neste caso ocorreria um processo contínuo de mudança da morfologia originada pela progradação da costa, a formação de novos cordões e a conseqüente diminuição do suprimento de areia para os cordões mais antigos. No Paraná, não se verifica tal situação, pois os cordões mais antigos podem ser mais retilíneos que os mais novos, o que reforça a idéia de que, durante a formação de cada cordão, deve ter havido mudanças em alguma das variáveis que comandaram sua evolução. Neste caso, as diferenças morfológicas podem ser atribuídas a mudanças nas condições climáticas durante

Figura 9 - Variáveis que influenciam a formação de uma duna frontal

Figure 9 - Variables that influence the foredune development

a formação dos cordões, tais como o regime das precipitações e/ou a frequência e intensidade dos ventos.

Dissipação das dunas Para explicar a inexistência de cordões dunares na parte interna da planície costeira, Bigarella (1965) propõe a ocorrência de um processo denominado dissipação. Os cordões dunares teriam existido sobre a planície; porém, mudanças climáticas do úmido para o semi-árido teriam provocado a diminuição da cobertura vegetal e propiciado, sob o efeito de chuvas concentradas, o colapso ou dissipação das dunas. Restaria, assim, a forma de perfil abaulado que se observa nos cordões mais antigos. Segundo o autor, contribui para essa interpretação o fato de não se observar estrutura "de espécie alguma" na parte superior do cordão. As estruturas teriam sido desfeitas no processo de dissipação da duna. Essa explicação é mantida em tra-

balhos posteriores (Bigarella *et al.*, 1969b, 1970/71, 1978, Bigarella 1972). Posteriormente, Bigarella (1975) descreveu detalhadamente estruturas que teriam sido originadas pelo processo de dissipação.

A existência de sedimentos sem estrutura visível na parte superior dos depósitos eólicos pode ser atribuída a outros processos. Os próprios autores os interpretam como sendo originados pela destruição das estruturas sedimentares pelas raízes e processos pedogenéticos (Bigarella *et al.* 1969, 1970/1971, Bigarella 1972). Em vários locais, observa-se que o desaparecimento das estruturas em direção à superfície é gradual, não havendo evidências de descontinuidades. Ademais, algumas das estruturas consideradas "de dissipação" por Bigarella (1975) são semelhantes às "bandas onduladas", que foram interpretadas por outros autores como sendo de origem pedogenética (Queiroz Neto 1975, Suguio & Coimbra 1976).

Os dados disponíveis indicam que cordões dunares desenvolvidos podem ocorrer até pelo menos a 1500 m da linha de costa atual. Na faixa onde não há cordões dunares, são visíveis lineamentos correspondentes a cristas praias ou cordões incipientes, evidenciando que os cordões desenvolvidos aí nunca existiram. Assim, parece claro que os cordões dunares da parte mais externa da planície têm sido preservados, sem grandes mudanças morfológicas, desde sua formação no Holoceno.

Na parte mais interna da planície, não foram observados cordões dunares. Deve-se lembrar que esta área correspondente aos terraços pleistocênicos foi submetida a intenso processo erosivo durante o abaixamento do nível de base de erosão ocorrido durante a última glaciação (Martin *et al.* 1988). Muitas das formas observadas são erosivas, sendo difícil encontrar superfícies intactas dos terraços (Angulo 1992) e, conseqüentemente, da morfologia dos cordões dunares.

O cordão dunar existente entre os morros Bento Alves e do Meio, na Ilha do Mel, apresenta um perfil transversal mais íngreme para barlavento, sugerindo ter sido parcialmente erodido quando o mar apresentava um nível relativo mais alto que o atual (Fig. 2). O cordão pode ter sido formado no Pleistoceno Superior ou no Holoceno, durante o ascenso do nível do mar anterior ao máximo da Transgressão Santos, ocorrido há aproximadamente 5.100 anos (Martin *et al.* 1988), evidenciando uma certa permanência da morfologia dunar por períodos mais longos.

Agradecimentos Ao professor Paulo César Giannini, pelas discussões, sugestões e cuidadosa leitura do original; ao Professor Elimar Trein, pelo auxílio na elaboração do abstract; ao Conselho Nacional de Pesquisas - CNPq e Projeto Evolução Geológica e Mineralizações-3-Convênio FINEP/PADCT-UFPR (nº 65.91.03.03.00), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGULO, R. J. 1992. *Geologia da Planície Costeira do Estado do Paraná*. São Paulo. 334 p. (Tese de Doutorado, IG-USP).
- BIGARELLA, J.J. 1946. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. *Arq. Biol. Tecn. de Curitiba*, 1:75-111.
- BIGARELLA, J.J. 1965. Nota explicativa acompanhando a folha geológica de Paranaguá. *Boi. Paraná. Geociênc.*, 13:1-15.
- BIGARELLA, J.J. 1972. Eolian environment their characteristics, recognition and importance. In: RECOGNITION OF ANCIENT SEDIMENTARY ENVIRONMENTS. Dallas, 1969. *Special Publication...* 1972. Dallas, Soc. EC. Paleont. Mineral - AAPG. n. 16, p. 11-62.
- BIGARELLA, J.J. 1975. Lagoa dune field (State of Santa Catarina, Brazil), a model of eolian and pluvial activity. *Bol. Parana. Geociênc.*, 33:133-167.
- BIGARELLA, J.J.; ALESSI, A.H.; BECKER, R.D.; DUARTE, G.K. 1969a. Textural characteristics of the coastal dune, sand ridge and beach sediments. *Bol. Parana. Geociênc.*, 27:15-80.
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; DUARTE, G.M. 1969b. Coastal dune structures from Paraná (Brazil). *Mar. Geol.*, 7:5-55.
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; MATOS, D.J.; WERNER, A. 1978. (ed.) *A Serra do Mar e a Porção Oriental do Estado do Paraná... Um Problema de Segurança Ambiental e Nacional*. Curitiba, SEPL/ADEA. 249 p.
- BIGARELLA, J.J.; DUARTE, M.G.; BECKER, R.D. 1970/71. Structural characteristics of the dune, foredune, interdune, beach, beach-dune ridge and sand ridge deposits. *Bol. Parana. Geociênc.*, 28:29:9-72.
- FRYBERGER, S.G. 1979. Dune forms and wind regime. In: McKEE, E.D. ed. *A Study of Global Sand Seas*. U.S. Geol. Surv. Paper, 1052: 137-169.
- GOLDSMITH, V. 1979. Coastal dunes. In: DYER, K.R. ed *Estuarine Hydrography and Sedimentation*. Cambridge, Cambridge Univ. Press. p. 171-235.
- HESP, P.A. 1983. Morphodynamics of incipient foredunes in NSW Australia. In: BROOKFIELD, M.E. & AHLBRANDT, T.S. ed. *Eolian Sediments and Processes*. Amsterdam, Elsevier. p. 325-342. (Developments in Sedimentology 38).
- HESP, PA 1988. Morphology, dynamics and internal stratification of some established foredune in southeast Australia. *Sediment. Geol.*, 55(1-2): 17-41.
- INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL 1990. *Macrozoneamento da AP A de Guaraqueçaba*. Curitiba, IPARDES. 2 v. 257 p.
- MARTIN, L. & SUGUIO, K. 1986. Excursion route along the coastal plains of states of Paraná and Santa Catarina In: INTERN. SYMP. SEA LEVEL CHANGES AND QUATERNARY SHORELINES. São Paulo, 1986. *Special Publication...* São Paulo, INQUA. n. 1, p.39-124.
- MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M.; AZEVEDO, A.E.G. 1988. *Mapa Geológico do Quaternário Costeiro dos Estados do Paraná e Santa Catarina*. Brasília, DNPM. 40 p. (Série Geologia 28,2 mapas).
- PETHICK, J. 1984. *An Introduction to Coastal Geomorphology*. London, E. Arnold. 260 p.
- EMPRESA DE PORTOS DO BRASIL S. A. 1988. *Relatório de Apresentação das Medições Meteorológicas Observadas em Pontal do Sul, Paranaguá-PR, Período Set 1982 a Dez. 1986*. Rio de Janeiro, Portobrás/INPH. 168 p.
- QUEIROZ NETO, J.P. 1975. Observações preliminares sobre perfis de solo com bandas onduladas no Estado de São Paulo. *Sedimentologia e Pedologia*, 7:1-34.
- SMITH, A. W. 1988. The behaviour of natural sand dunes. *Shore and Beach*, 56(4):24-29.
- SUGUIO, K. & COIMBRA, A.M. 1976. Estudo sedimentológico das "bandas onduladas" de solos da Formação Bauru na área balisada pelas cidades de Osvaldo Cruz - Rancharia e Tupã, Estado de São Paulo. *Bol. IG-USP*, 7(27):27-28.
- TOMAZELLI, L.J. 1990. *Contribuição ao Estudo dos Sistemas Deposicionais Holocênicos do Nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul, com Ênfase no Sistema Eólico*. Porto Alegre. 270 p. (Tese de Doutorado, IG/UFRGS).

MANUSCRITO A756

Recebido em 29 de março de 1993

Revisão do autor em 4 de agosto de 1993

Revisão aceita em 4 de agosto de 1993