

## CLASSIFICAÇÃO E DINÂMICA DE FEIÇÕES EÓLICAS COSTEIRAS: UM MODELO SISTÊMICO BASEADO EM EXEMPLOS BRASILEIROS

Paulo C.F. Giannini<sup>1</sup>; André O. Sawakuchi<sup>1</sup>; Caroline T. Martinho<sup>2</sup>; Carlos C.F. Guedes<sup>1</sup>; Daniel R. Nascimento Jr.<sup>1</sup>; Ana P.B. Tanaka<sup>3</sup>; Vinícius R. Mendes<sup>1</sup>; André Zular<sup>1</sup>; Helena A.A. Andrade<sup>1</sup>; Milene Fornari<sup>1</sup>  
pcgianni@usp.br

<sup>1</sup>- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo; <sup>2</sup>- Instituto de Geociências, Universidade de Brasília; <sup>3</sup>- Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A.  
Rua do Lago, 562, São Paulo-SP, Brasil, CEP 05508-080

*Palavras-chave:* Sistema eólico costeiro, Teoria de sistemas, Classificação de dunas, Morfodinâmica eólica

### 1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo conceitual para a dinâmica de sistemas eólicos costeiros, compatível com a “teoria geral de sistemas”, e calcado em exemplos brasileiros.

A primeira etapa da descrição de um sistema é sua abordagem como “uma caixa”, domínio do espaço, cujo volume e geometria são determinados por entradas e saídas e pelas variáveis do meio capazes de exercer controle sobre estas entradas e saídas. Entradas, no caso, correspondem a influxo (deriva eólica efetiva), e saídas, a efluxo (Kocurek & Havholm 1993). O espaço de estocagem ou de acumulação delimita-se pela extensão da área fonte (prisma intermarés) e pelas dimensões de equilíbrio ou de saturação, isto é, distância no rumo do vento ( $D_{eq}$ ) e altura ( $H_{eq}$ ) dentro das quais o saldo influxo menos efluxo no sistema permaneça positivo. As dimensões de saturação dependem da posição do nível freático relativa à superfície deposicional, controlada pelo clima e pela subsidência, os quais, nos casos costeiros, agem juntos através do nível relativo do mar (NRM).

A segunda etapa da análise de um sistema (item 2 deste resumo) é a descrição interna ou estrutural. Consiste em reconhecer suas partes constituintes e caracterizar a respectiva distribuição espacial. A descrição das partes só tem sentido quando elas são vistas em grupos, com funções determinadas. Função aqui refere-se a fluxo de sedimentos, devendo portanto seguir-se do proximal para o distal; e partes constituintes refere-se a elementos morfológicos.

A terceira etapa do estudo sistêmico (item 3) é a análise de estabilidade, isto é, como o sistema evolui no tempo, em resposta a oscilações em variáveis como aporte e espaço de acumulação.

### 2. ELEMENTOS MORFOLÓGICOS E SUAS ASSOCIAÇÕES

Rumo sotavento, os elementos morfológicos identificados nos sistemas eólicos costeiros do Brasil podem ser divididos, quanto à sua função, em quatro grupos: 1. de estoque inicial (dunas frontais, franjas de areia eólica, protodunas e dunas sem vegetação de orientação transversal ao vento); 2. de deflação (rupturas de deflação, rastros lineares residuais,

retrocordões e dunas parabólicas), com função de separar o estoque inicial (1) do final (3 e/ou 4); 3. de superposição ou cavalgamento (dunas barcanas e cadeias barcanóides), com papel de elevar a acumulação até  $H_{eq}$ ; e 4. de avanço (cordões de precipitação e lobos deposicionais), com função de estender o campo de dunas, lateral e longitudinalmente, até sua  $D_{eq}$ . Sob condição de desequilíbrio construtivo (influxo maior que efluxo) em dado grupo funcional de elementos morfológicos, o excesso de areia tende a ser consumido na formação e alimentação de grupo a sotavento. Os grupos funcionais constituem domínios espaciais interligados, com posição e morfologia definida dentro do sistema. Sob esse aspecto, guardam estreita relação com associações de fácies deposicionais. Desse modo, os elementos de estoque inicial compõem a associação praia-duna (A); os elementos de deflação reúnem-se na associação planície deflacionar (B); e os elementos de cavalgamento e de avanço, separados ou associados, definem a associação campo de dunas livres (C). Os sistemas eólicos costeiros podem desdobrar-se em quatro categorias, conforme o equilíbrio entre sedimento disponível e energia do vento (e entre influxo e efluxo) seja alcançado na associação praia-duna (A), na relação entre a associação praia-duna e a associação planície de deflação (A-B), na relação entre as associações praia-duna, planície de deflação e campo de dunas livres (A-B-C) ou na relação direta entre as associações praia-duna e campo de dunas livres (A-C). Este último caso representa equilíbrio entre influxo e efluxo ainda não atingido (campo de dunas em formação). Destas relações, saem oito estágios ou tipos morfodinâmicos de sistemas eólicos, numerados de 1 a 8 em grau crescente de relação saldo eólico / espaço de acumulação, isto é, saldo eólico relativo (Figura 1).

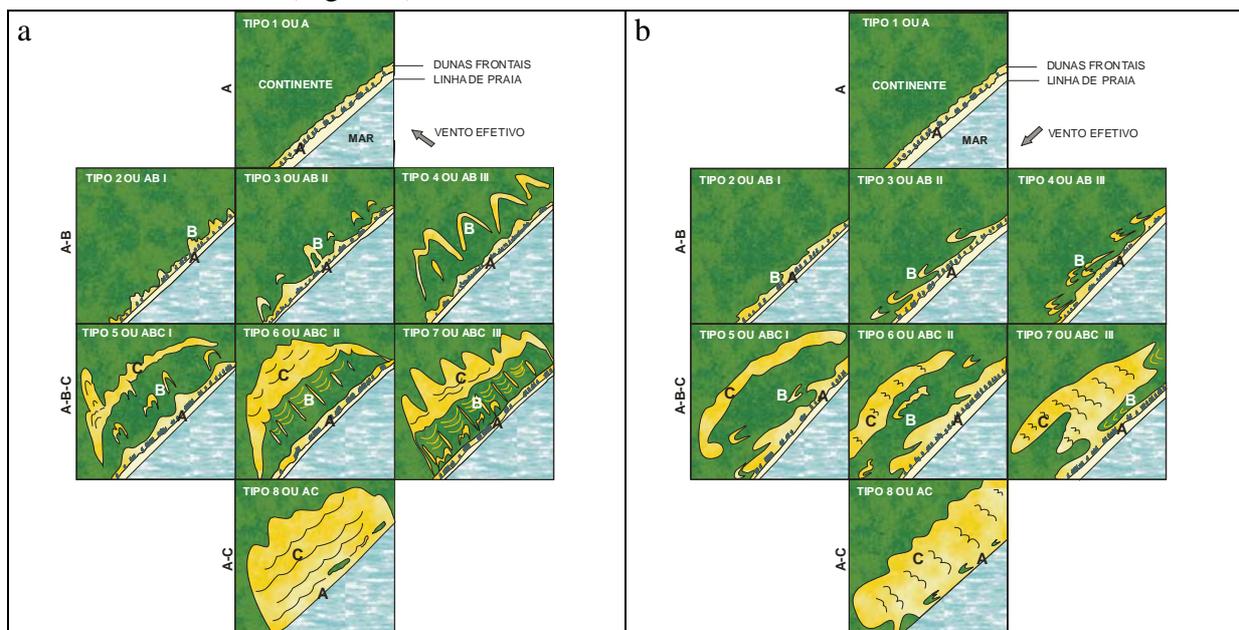


Figura 1. Tipos de sistemas eólicos costeiros do Brasil, sob condição de vento efetivo transversal (a) e sub-paralelo (b) à linha de costa. A, B e C são associações de elementos morfológicos: praia-duna, planície deflacionar e campo de dunas livres, respectivamente. Do tipo 1 ao 8, tem-se crescimento no saldo sedimentar eólico relativo (aporte eólico / espaço de acumulação).

### 3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SISTEMA

#### 3.1. Desequilíbrios próximos do equilíbrio

Oscilações menores no saldo eólico relativo levam a desequilíbrios próximos do equilíbrio, às quais o sistema responde no sentido oposto ao da perturbação, numa reação de retroalimentação clássica ou negativa (auto-regulação ou resiliência). Por exemplo, se a costa possui comportamento temporário transgressivo, o aumento imediato de saldo relativo provocado pela perda de espaço de acumulação é compensado pela saída de areias eólicas por erosão subaquosa e pelo incremento de coesão nas interdunas. Quanto à arquitetura deposicional, há pelo menos três casos resultantes de auto-regulação. O caso I é de linha de costa estável e equilíbrio ainda não alcançado (Figura 2a). O caso II é com configuração de equilíbrio alcançada, mas com balanço influxo-efluxo no sistema como todo ainda positivo (Figura 2b); o sistema mantém-se através da subdivisão em duas porções, separadas por planície de deflação, de modo que a porção mais proximal passe a atuar como fonte para a distal. Pode representar a transformação de um campo de dunas primário (derivado diretamente da praia) em secundário, com re-estocagem de areia eólica na forma de um novo campo de dunas primário em iniciação (Figura 2b). No caso III, sob  $D_{eq}$  atingida e saldo influxo-efluxo no sistema nulo, a porção interior do sistema passa simplesmente a migrar (Figura 3a). Esta migração leva ao distanciamento desta parte do sistema, em relação à área fonte, além da  $D_{eq}$  e, a médio prazo, à sua estabilização. Ao mesmo tempo, um novo foco de deposição eólica ativo tende a surgir junto à praia. Uma possibilidade de caso III é o recuo das fácies de avanço durante regressão da linha de costa (Figura 3b), numa geometria que poderia ser confundida com a de planície de cordões litorâneos clássica, como na região de Rondinha e Capão Novo, RS (Martinho *et al.* 2010).

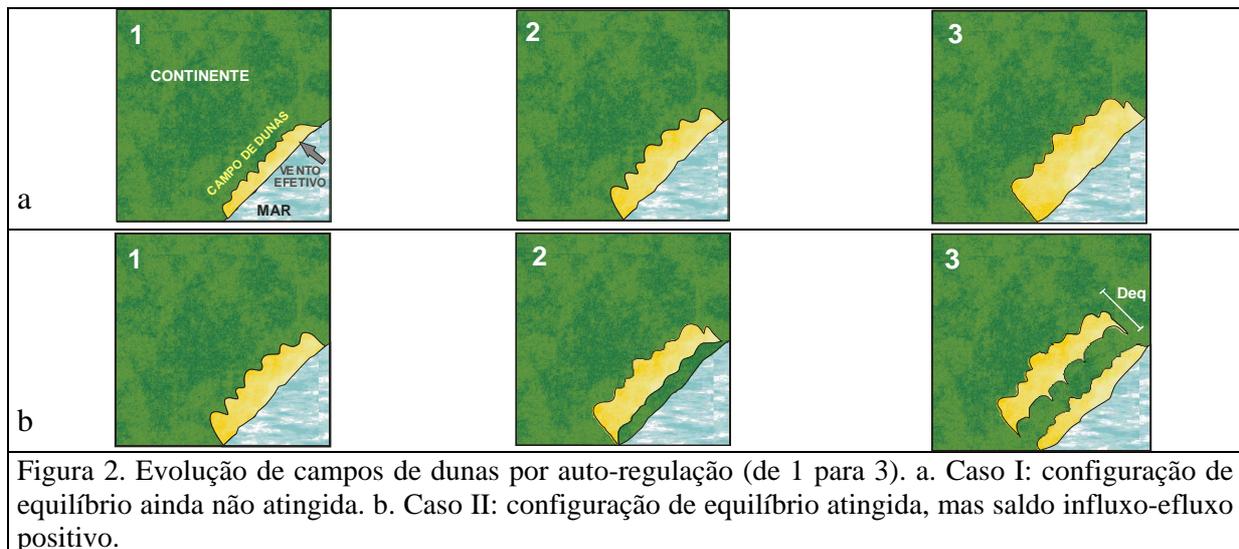


Figura 2. Evolução de campos de dunas por auto-regulação (de 1 para 3). a. Caso I: configuração de equilíbrio ainda não atingida. b. Caso II: configuração de equilíbrio atingida, mas saldo influxo-efluxo positivo.

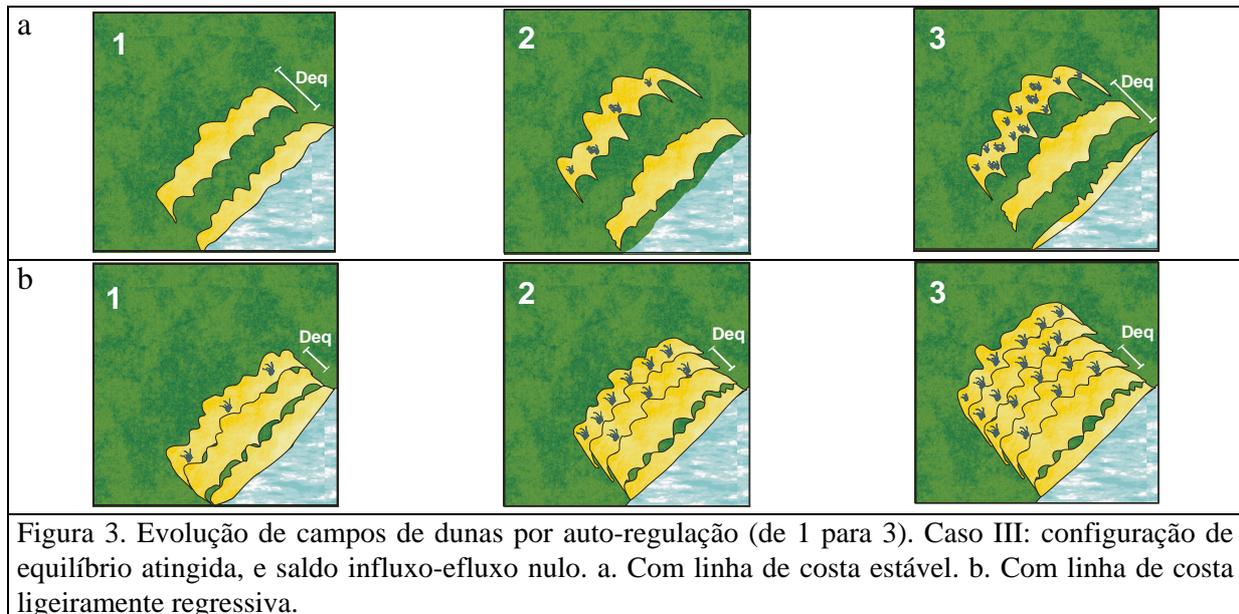


Figura 3. Evolução de campos de dunas por auto-regulação (de 1 para 3). Caso III: configuração de equilíbrio atingida, e saldo influxo-efluxo nulo. a. Com linha de costa estável. b. Com linha de costa ligeiramente regressiva.

### 3.2. Desequilíbrios distantes do equilíbrio

Quando o sistema é submetido a mudanças drásticas na relação entre influxo e efluxo e/ou no espaço de acumulação, tem-se um desequilíbrio muito distante do equilíbrio, ao que ele reage por retroalimentação positiva (auto-organização; evolução espontânea ou transiente). Corresponde à transformação do sistema eólico de um tipo em outro em poucos anos a séculos, portanto em processo instantâneo na escala de tempo geológica. Sob condição de saldo sedimentar específico decrescente (queda absoluta do saldo influxo-efluxo e/ou aumento absoluto de espaço), a reação consiste em deslocar o sistema para um novo equilíbrio dinâmico, em que a retenção de areia seja menor, portanto para estágio morfodinâmico de número (geralmente seguinte) inferior na Figura 1. Se a linha de costa regride irreversivelmente, por exemplo, parte da areia que antes se encontrava em circulação no sistema praia-duna passa a ser consumida para a construção dos elementos subaquosos progradantes, o que diminui a disponibilidade de areia para o sistema eólico, ao mesmo tempo em que amplia o espaço de acumulação; neste caso, a reação do sistema é deslocar-se para estágio compatível com menor consumo de areia eólica, como aparentemente ocorre, nos últimos 60 anos, em São Simão, Dunas Altas e Magistério, RS (Martinho *et al.* 2010).

Se o saldo sedimentar específico cresce bruscamente, a reação consiste em deslocar o sistema para um novo equilíbrio dinâmico, em que a retenção de areia seja maior, portanto para estágio morfodinâmico de número superior. Reconhecem-se aí três novos casos de construção de arquitetura deposicional. I. Sob aumento abrupto de aporte (por exemplo, crescimento exponencial do aporte eólico absoluto), aumenta a  $D_{eq}$  e somem gradativamente as planícies deflacionares. II. Sob alternância de equilíbrios distintos por variação de espaço de acumulação (linha de costa regressiva em pulsos), pode aparecer padrão com cordões de idade

intermediária entre (e sob) os campos de dunas sucessivos (Figura 4a). É assim em Campos Verdes, Laguna (Tanaka *et al.* 2009) e na enseada da Pinheira, em SC (Hesp *et al.* 2009). III. Com transgressão acentuada, por subida de NRM ou erosão costeira, a arquitetura é caracterizada por inundação das fácies mais proximais e redução da área de acumulação, com concentração do aporte eólico e aumento da saturação sedimentar (Figura 4b). A tendência é o crescimento ascendente da representatividade de fácies de cavalgamento e avanço, principalmente em relação a fácies de deflação, e a deposição de fácies subaquosas sobre fácies de deflação.

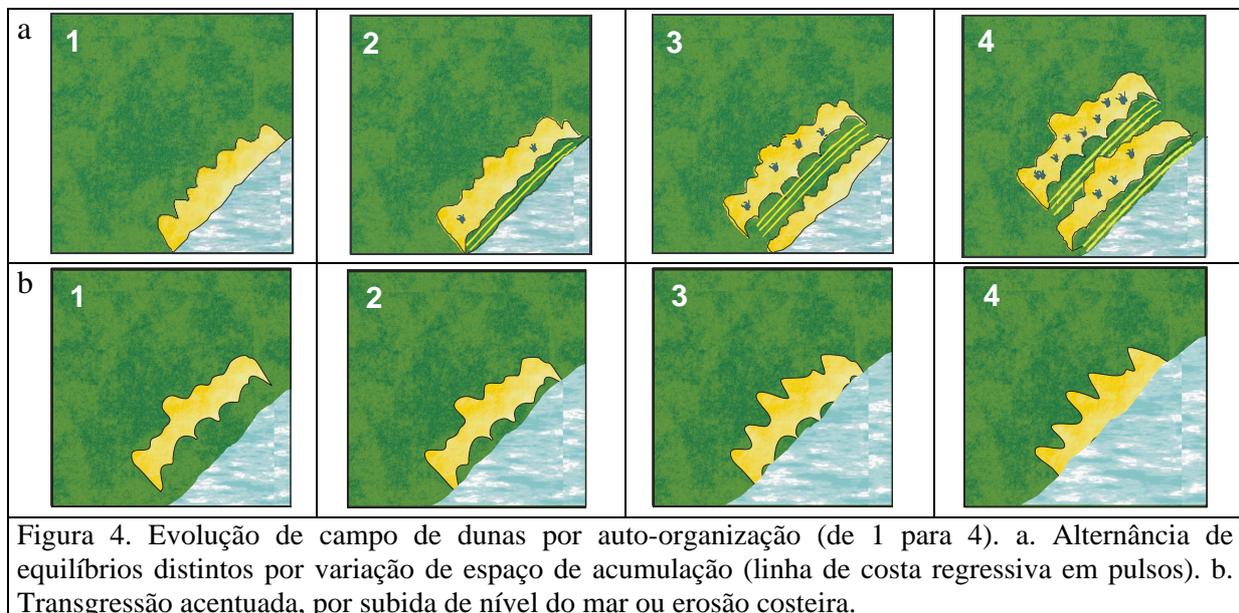


Figura 4. Evolução de campo de dunas por auto-organização (de 1 para 4). a. Alternância de equilíbrios distintos por variação de espaço de acumulação (linha de costa regressiva em pulsos). b. Transgressão acentuada, por subida de nível do mar ou erosão costeira.

## REFERÊNCIAS

- Hesp, P.A., Giannini, P.C.F., Martinho, C.T., Miot Da Silva, G., Asp Neto, N.E., 2010. The Holocene barrier system of the Santa Catarina coast, Southern Brazil. In: Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. ed. *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Berlin – Heidelberg, Springer, pp.93-134.
- Kocurek, G., & Havholm, K.G., 1993. Eolian Sequence Stratigraphy – A Conceptual Framework. In: *Siliciclastic Sequence Stratigraphy*, pp.393-409. AAPG Memoir, 58.
- Martinho, C.T., Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology*, vol. 117, n. 1/2, pp.14-32.
- Tanaka, A.P.B., Giannini, P.C.F., Fornari, M., Nascimento, D.R., Jr., Sawakuchi, A.O., Rodrigues, S.I., Menezes, P.M.L., De Blasis, P., Porsani, J.L. 2009. A planície costeira holocênica de Campos Verdes (Laguna, SC): evolução sedimentar inferida a partir de georradar (GPR), granulometria e minerais pesados. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 39, n. 4, pp. 750-766.