

POTENCIAL DE FORMAÇÃO DE ESPORÕES EM LAGUNAS

ALVES, A. R.¹

¹Diretoria de Hidrografia e Navegação. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha.
Universidade Federal Fluminense e-mail: albanoribeiro@terra.com.br

WASSERMAM, J. C. F. A.²

²Departamento de Análise Geoambiental. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha,
Universidade Federal Fluminense, e-mail: geowass@vm.uff.br

FERNANDEZ, G. B.³

³Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Departamento de Geografia, Laboratório de Geografia Física (LAGEF), Universidade Federal Fluminense e-mail: guilherme@igco.uff.br

RESUMO

Este trabalho utiliza a modelagem numérica para gerar o clima de ondas em uma laguna hipotética de geometria simples, cujas dimensões são semelhantes as da Lagoa de Araruama, localizada no litoral do estado do Rio de Janeiro. Reconhece-se que as ondas nesta parte do litoral são o principal agente modificador da morfologia costeira. Em sistemas lagunares a ação de ondas se traduz de forma mais evidente pela formação de esporões. O litoral fluminense se presta a este estudo pela freqüente presença de sistemas lagunares e desenvolvimento deste tipo de feição. A série temporal de ondas resultante das simulações feitas a partir de dados locais de ventos, foi utilizada para a determinação do índice de estabilidade da linha de costa. A estabilidade é definida em função das características das ondas dominantes, que atingem o litoral de forma oblíqua. Assim, ondas com ângulo de incidência maior que aquele que promove o transporte máximo, quando encontram uma perturbação na linha de costa, reduzindo desta forma o ângulo e conseqüentemente aumentando o fluxo de sedimentos, causam erosão. Na crista da perturbação ocorre o contrário, já que o gradiente negativo do fluxo de sedimentos promove assoreamento. Portanto, a perturbação tende a crescer caracterizando a instabilidade da região, formando um esporão. Ondas com incidência menos oblíqua determinam o desaparecimento da perturbação (costa estável), erodindo a crista e assoreando os flancos. De fato os resultados para o cálculo do índice de estabilidade indicam uma forte difusividade residual negativa tornando a região potencialmente propícia ao desenvolvimento do processo construtivo/erosivo associado à evolução de esporões. O remanescente do cordão litorâneo pleistocênico da Lagoa de Araruama apresenta-se fragmentado. Portanto, a partir dos dados apresentados neste trabalho pode-se concluir que a fragmentação e o adelgaçamento do cordão litorâneo podem estar correlacionados com a formação destes esporões durante o holoceno.

Palavras chave: estabilidade da linha de costa, esporões lagunares, transporte litorâneo.

INTRODUÇÃO

O principal agente modelador em costas submetidas à micro-marés, em áreas de influência de aliseos e frentes frias, são as ondas de gravidade. As ondas de gravidade são perturbações na superfície da água geradas pelo vento. Desta forma em áreas dominadas por ondas a morfologia do litoral é modificada de forma sistemática pelo transporte de sedimentos causado por estas ondulações. Exemplos de estudos de transporte de sedimentos aplicados à morfologia costeira são inúmeros, indo desde migração de bancos arenosos na zona de surfe em rápidas respostas as variações de amplitude das ondas, até geologicamente quando governam processos erosivos e deposicionais alterando a linha de costa. Apesar do grande número de trabalhos de aplicação de transporte de sedimentos na

zona costeira, poucos são os que tratam das modificações morfológicas ocorridas em corpos d'água fechados ou semi-fechados representados por lagunas litorâneas.

Os estudos iniciais relativos às modificações morfológicas em sistemas lagunares foram realizados por ZENKOVICH (1959), que sugere a contínua formação de esporões nas lagunas pela variação espacial do fluxo de sedimentos, quando ondas oblíquas incidem sobre uma irregularidade da linha de costa. Os esporões são protuberâncias na linha de costa em forma de cúspides, formadas por material não coesivo. Estas feições geomorfológicas são comuns em lagunas de todo o mundo e no Brasil os principais exemplos são aqueles encontrados na Lagoa dos Patos (RS) e na Lagoa de Araruama (RJ). Mais recentemente porém, ASHTON (2001) recupera estes estudos iniciais e elabora um modelo numérico onde as irregularidades da linha de costa evoluem para feições morfológicas rítmicas como as encontradas na natureza, a partir da obliquidade de incidência das ondas. As observações de Ashton porém não foram testadas em sistemas lagunares

Desta forma este trabalho teve como objetivo verificar a instabilidade da linha de costa, que se traduz pela formação e crescimento de esporões, numa laguna hipotética cuja geometria se aproxima daquela da laguna de Araruama (RJ). Para tanto, foram aplicados modelos numéricos de geração de ondas que determinam, para diferentes direções de ventos, alterações morfológicas na zona costeira.

ÁREA DE ESTUDO

O litoral do estado do Rio de Janeiro se apresenta morfológicamente marcado em grande parte de sua extensão por sistemas de cordões litorâneos transgressivos com formações de lagunas em estágios diversos de involução (MUEHE, 1994). Estes estágios de involução são marcados por diferentes graus de colmatação, associados ao natural processo de extinção que estas lagunas sofrem num curto espaço de tempo geológico. No caso do litoral do Rio de Janeiro diversos autores reconheceram duas formações lagunares que se estabeleceram no reverso de cordões litorâneos associados aos dois últimos máximos transgressivos (TURCQ, *et al.* 1999). Desta forma o conjunto de lagoas associado a Rodrigo de Freitas, Maricá-Guarapina, Saquarema e Araruama, se estabelece entre o reverso do cordão pleistocênico e a estrutura cristalina dos maciços costeiros. A forma destas lagunas portanto, tem no controle estrutural do cristalino toda a margem superior, e a base sedimentar marcam a morfologia mais próxima ao oceano. Um segundo

conjunto foi formado entre a base do sistema regressivo frontal ao cordão mais antigo e o reverso do cordão holocênico, que garante uma morfologia alongada a estas lagunas.

Uma vez definidas as linhas gerais da morfologia lagunar, é possível se identificar modificações desta morfologia, principalmente pela formação de esporões lagunares, resultantes da mobilização de sedimentos ao longo do perímetro das lagunas por ondas geradas no seu interior. Os esporões são protuberâncias na linha de costa em forma de cúspides, formadas por material não coesivo. Estas feições geomorfológicas são comuns em lagunas de todo o mundo e no Brasil e dos principais exemplos são aqueles encontrados na laguna de Araruama (RJ).



Fig. 1. Lagoa de Araruama, onde se destacam os esporões lagunares assimétricos.

METODOLOGIA

Transporte litorâneo

O transporte de sedimentos na zona de arrebatção é nulo para ondas com incidência normal ($\phi_0 = 0^\circ$) e para ondas transversais à linha de costa ($\phi_0 = 90^\circ$), conforme mostra a figura 2. Entre estes dois valores existe um ângulo crítico (em torno de 45°) que promove um valor máximo para o transporte litorâneo. Assim, ondas com ângulo de incidência maior que o crítico, quando encontram uma perturbação na tendência geral da linha de costa, reduzindo o ângulo e aumentando o fluxo de sedimentos, causam erosão. Na crista da perturbação ocorre o contrário, já que o gradiente negativo do fluxo de sedimentos promove assoreamento. Portanto, a perturbação tende a crescer caracterizando

a instabilidade da região. Ondas com incidência menos oblíqua determinam o desaparecimento da perturbação (costa estável), erodindo a crista e assoreando os flancos (ASHTON E MURRAY, submetido, a). Este mecanismo conceitual é assumido neste trabalho para explicar a formação e crescimento de esporões lagunares.

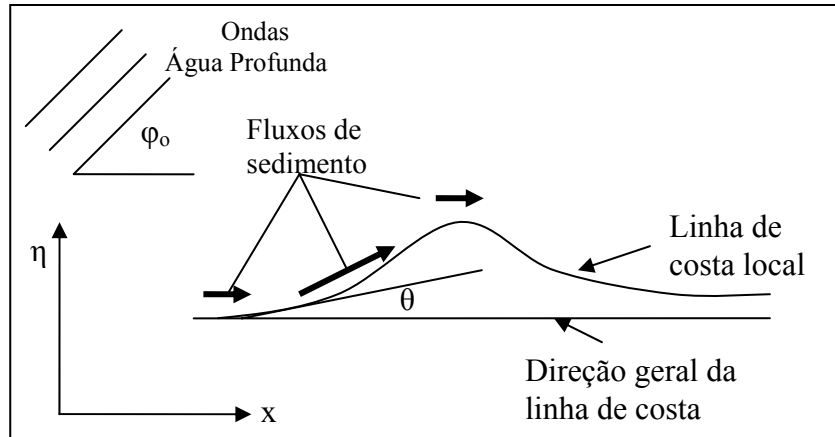


Fig. 2: Definição dos ângulos e coordenadas utilizados, representando o modelo conceitual para a formação de esporões.

A possibilidade da ocorrência de instabilidade na linha de costa foi primeiramente apontada por ZENKOVITCH (1959) e evoluiu para expressões analíticas que demonstram uma difusividade negativa para $\varphi_0 > 45^\circ$ (ASHTON, 2001). Considerando-se a equação de conservação de sedimentos

$$\partial \eta / \partial t = -(1/D) \partial Q_s / \partial x \quad (1)$$

Onde:

D = profundidade de fechamento do perfil.

η = posição da linha de costa na direção transversal.

Q_s = fluxo de sedimentos.

e representando-se o fluxo de sedimentos em função do ângulo de incidência das ondas em água profunda (φ_0), escreve-se

$$Q_s = K T^{1/5} H_0^{12/5} \sin(\varphi_0 - \theta) \cos^{6/5}(\varphi_0 - \theta) \quad (2)$$

Onde:

K = coeficiente de correlação.

H_0 = altura significativa em água profunda.

T = período das ondas.

θ = direção da linha de costa.

Assim, pode-se deduzir uma equação de difusão substituindo-se (2) em (1), o que resulta em:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad e \quad (3)$$

$$\mu = (1/D) K T^{1/5} H_0^{12/5} \cos^{1/5}(\varphi_0 - \theta) [\cos^2(\varphi_0 - \theta) - (6/5)\text{sen}^2(\varphi_0 - \theta)] \quad (4)$$

Onde:

μ = difusividade da linha de costa.

A análise desta expressão mostra uma dependência da difusividade com o ângulo de incidência em relação ao alinhamento local da linha de costa ($\varphi_0 - \theta$) sendo positiva para $(\varphi_0 - \theta) < 45^\circ$, associada à tendência das ondas a retilinizar o litoral, desfazendo as irregularidades e negativa para $(\varphi_0 - \theta) > 45^\circ$, promovendo a evolução da sinuosidade da linha de costa, ondas difusivas e antidifusivas, respectivamente (Figura 3).

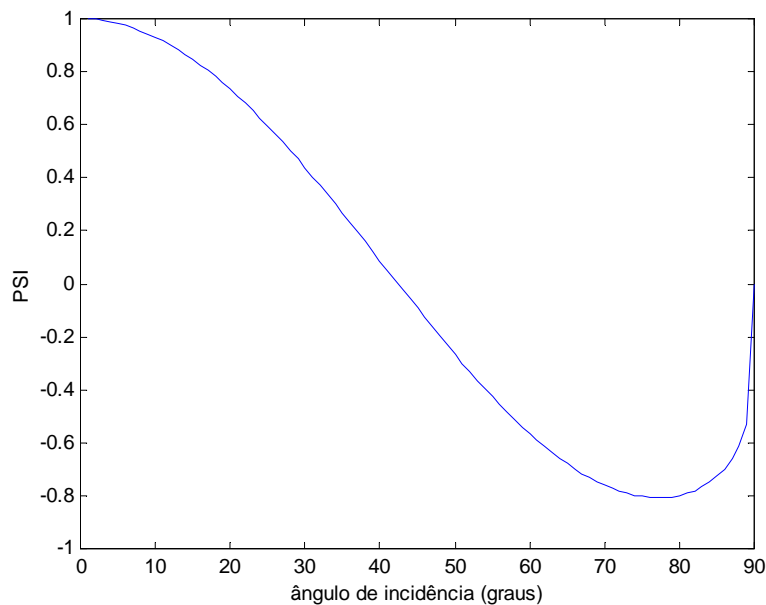


Fig. 3. Dependência da difusividade com o ângulo de incidência.

O processo de formação dos esporões é determinado pelo gradiente do fluxo de sedimentos na linha de costa, sob a ação de um clima de ondas antidifusivo. Desta forma, busca-se neste trabalho, a verificação da aplicabilidade desta teoria na região de Araruama.

Determinação do clima de ondas

Para determinação do clima de ondas foi utilizada uma série temporal de ventos, abrangendo um ano a cada intervalo de 3 horas, da estação de São Pedro D'Aldeia (RJ). Estes dados serviram de entrada em um modelo de geração de ondas (*Simulating Waves Nearshore*, SWAN). O corpo d'água modelado constitui uma laguna com 39 km de comprimento na direção E-W e 9,6 km de largura com profundidade constante igual a 6 m,

parâmetros de perímetro similares ao do sistema lagunar de Araruama. O valor de batimetria foi escolhido de maneira a garantir que as ondas não seriam afetadas pelo fundo. A grade computacional apresenta 15 pontos na direção E-W e 6 pontos na direção N-S, espaçados de 2,6 km e 1,6 km, respectivamente.

Cálculo do índice de estabilidade

A contribuição para a evolução da linha de costa causada pela série temporal de ondas obtida pelo modelo foi determinada através do somatório da difusividade para cada instante, obtendo-se assim, a difusividade residual (eq. 5) para o período estudado. Dividindo-se pelo somatório do seu valor absoluto, determina-se o índice de estabilidade (Γ) conforme representado na equação 6 (ASHTON E MURRAY, submetido, b). Este pode ser positivo para um clima de ondas difusivo, denotando estabilidade da linha de costa. Por outro lado se o valor for negativo, a linha de costa é considerada instável.

$$\mu_{residual} = \frac{\sum_i^n \mu_i \Delta t}{\sum_i^n \Delta t} \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{\sum_i^n \mu_i \Delta t}{\sum_i^n |\mu_i| \Delta t} \quad (6)$$

RESULTADOS

A partir do tratamento estatístico dos dados da estação meteorológica, foi possível se estabelecer a rosa dos ventos, que serviu de entrada para o modelo (Fig. 4). Nesta figura nota-se a franca dominância dos ventos do quadrante NE, com velocidade mais freqüente entre 5 e 7,5 m s⁻¹. Estes resultados sugerem que existe uma assimetria na entrada de ventos que esta relacionada ao clima de ondas diferenciado na laguna.

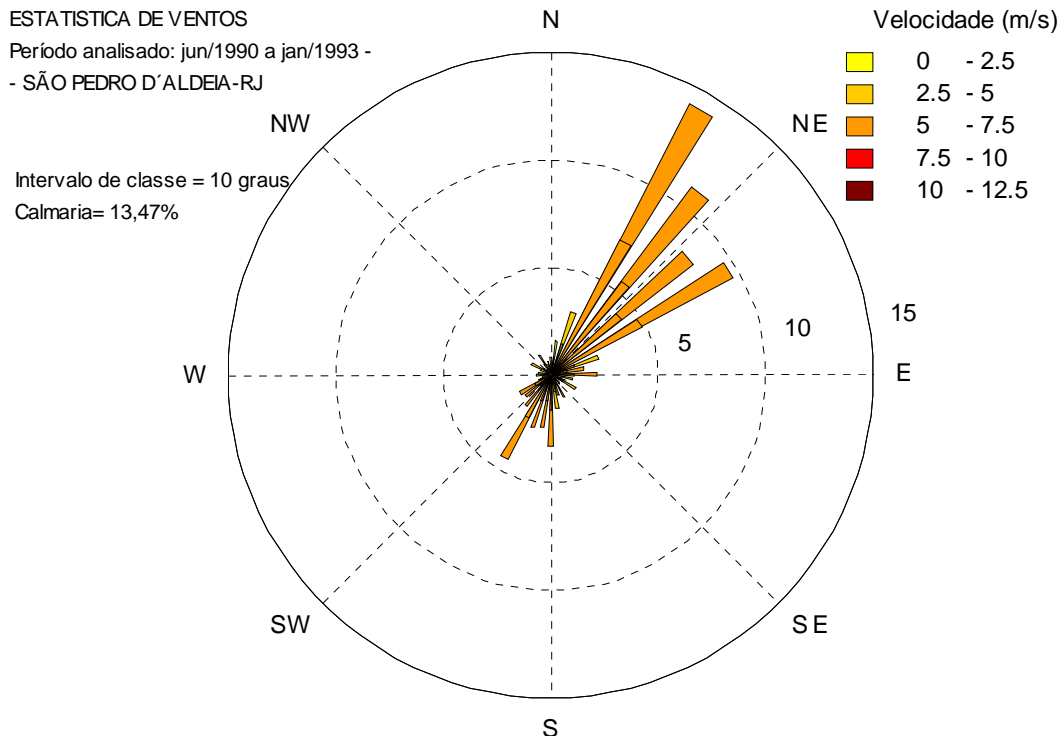


Fig. 4. Estatística das direções dos ventos, onde nota-se uma predominância de ventos do quadrante NE.

A simulação computacional alimentado pelos ventos analisados produziu séries temporais de altura significativa, período e direção das ondas. Foram selecionados 6 pontos de saída do modelo, localizados a 3,2 km da margem sul do corpo d'água modelado, espaçados de 5 km. Para cada um destes pontos foi determinado o índice de estabilidade (Figura 5).

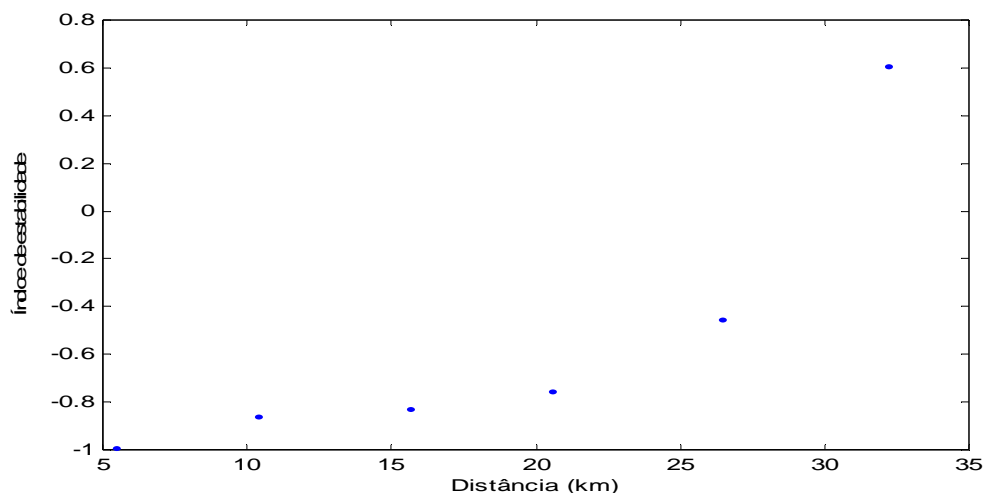


Fig. 5: Variação espacial do índice de estabilidade, onde se pode observar apenas um ponto positivo.

Nota-se que para quase todo o corpo d'água modelado, o índice de estabilidade é fortemente negativo, conforme mostra a figura 5, com exceção da porção oriental extrema,

onde o valor positivo denota a predominância de ondas difusivas. Isto pode ser explicado considerando-se que embora os ventos predominantes na região estudada sejam de leste e nordeste, a limitação da pista para estas direções faz com que o espalhamento da energia, nesta porção, seja para sul e para sudeste, produzindo uma ondulação de maior energia com baixa obliquidade.

CONCLUSÕES

A característica do clima de ondas determinado neste trabalho indica que a região estudada é fortemente instável. Portanto, os esporões encontrados na laguna de Araruama provavelmente têm sua evolução intimamente ligada ao processo descrito por ZENKOVITCH (1959) e ASHTON (2001). De fato os resultados para o cálculo do índice de estabilidade indicam uma forte difusividade residual negativa tornando a região potencialmente propícia ao desenvolvimento do processo construtivo/erosivo associado à evolução de esporões. O remanescente do cordão litorâneo pleistocênico da Lagoa de Araruama apresenta-se fragmentado. Portanto, a partir dos dados apresentados neste trabalho pode-se concluir que a fragmentação e o adelgaçamento do cordão litorâneo podem estar correlacionados com a formação destes esporões durante o holoceno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHTON, A., & MURRAY, A. B. Submetido, a. Consequences of an instability in shoreline shape due to alongshore wave-driven sediment transport, Part 1: Theoretical and numerical investigations. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*.
- ASHTON, A., & MURRAY, A. B. Submetido, b. Consequences of an instability in shoreline shape due to alongshore wave-driven sediment transport, Part 2: Wave climate analysis and comparisons to nature. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*.
- ASHTON, A., A. B. MURRAY, and O. ARNOULT (2001). Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves. *Nature*, 414, 296-300.
- MUEHE, D. 1994. Lagoa de Araruama: geomorfologia e sedimentação. *Cadernos de Geociências*. Vol (10) 53-62.
- TURCQ, B.; MARTIN, L.; FLEXOR, J.M.; SUGUIO, K. & TASAYACO-ORTEGA, L. 1999. Origin and evolution of Quaternary coastal plain between Guaratiba and cape Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. In Knoppers, B.A., Bidone, E.D. & Abrão, J.J. (Eds.). *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon System of Rio de Janeiro Brazil*. Série Geoquímica Ambiental, 6: 25-46 pp.
- ZENKOVITCH VP, 1959. On the genesis of cusped spits along lagoon shores. *Journal of Geology*, 67(3): 269-277.