

A DERIVA E O TRANSPORTE LITORÂNEO DE SEDIMENTOS NO TRECHO ENTRE CUMBUÇO E MATÕES – COSTA NOROESTE DO ESTADO DO CEARÁ

Drift and littoral transport of sediments on the costal stretch between Cumbuco and Matões, Northwest Ceará State

Alexandre Medeiros Carvalho¹, Luís Parente Maia², José Maria Landim Dominguez³

RESUMO

O estudo hidrodinâmico do trecho litorâneo entre Cumbuco e Matões, costa NW do Estado do Ceará, foi realizado tomando como base um método empírico que utiliza o processo gráfico de confecção de diagrama de refração, associado a trabalhos de campo. Este procedimento considerou também a influência da geometria costeira no processo morfogenético, onde o vento e as ondas exercem papel fundamental. Os cálculos da intensidade e sentido da deriva litorânea demonstraram sua maior efetividade no sentido de SE-NW, e sua intensidade varia para os diferentes trechos da linha de costa. Esta abordagem resultou na concepção de um modelo que trata do comportamento da geometria costeira em forma de espiral, considerando principalmente a deriva litorânea de sedimentos, onde os resultados empíricos puderam ser associados às respostas observadas em campo, as quais são materializadas em processos erosivos e/ou deposicionais.

Palavras-chaves: *sedimentos, deriva, transporte litorâneo, sistema ondulatório, Estado do Ceará.*

ABSTRACT

The hydrodynamic study of the littoral sector between Cumbuco and Matões, NW coast of Ceará Sstate, was carried out through an empirical method that makes use of a graph-based refraction diagram associated with field work. This procedure has also considered the the coastal geometry influence on geomorphogenesis processes, where wind and waves exert a fundamental role. Modelling of the intensity and direction of the longshore transport has shown that the prevailing direction is SE-SW and its intensity is changeable in the various costal sectors. This approach led to the development of a concept model which deals with a spiral-shaped coast geometry, mostly considering the potential sediment littoral drift, whose empiric results could be associated with field observations evidenced as erosive and/or depositional processes.

Key words: *sediments, drift, littoral transport, wave system, Ceará State.*

¹ Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza.

² Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Av. da Abolição, 3207, Fortaleza.

³ Departamento de Geologia, Universidade Federal da Bahia.

INTRODUÇÃO

Entre os agentes que participam do transporte e distribuição de sedimentos na zona costeira, as ondas respondem pela maior parte deste processo. Notadamente, a dispersão de sedimentos ao longo da linha de costa é basicamente determinada pela intensidade e distribuição da energia das ondas e a interação entre a sua propagação com o fundo marinho e/ou obstáculos ao seu deslocamento, o que resulta em modificações na sua altura e trajetória, principalmente através do processo de refração.

O estudo deste processo é, portanto, de fundamental importância para a compreensão da dinâmica de transporte e dispersão de sedimentos ao longo da linha de costa.

Com o objetivo de avaliar o comportamento das ondas e a distribuição de sua energia ao longo de um trecho litorâneo de considerável importância, dedicou-se este trabalho à aplicação de técnicas adequadas a este estudo na região, considerando-se como principais objetivos o cálculo da intensidade e sentido da deriva litorânea.

ÁREA DE ESTUDO

O Estado do Ceará está localizado no Nordeste do Brasil, possuindo uma costa com 573 km de comprimento. A área selecionada para o desenvolvimento deste trabalho inclui uma faixa costeira de aproximadamente 170 km de extensão posicionada no litoral noroeste do Estado do Ceará, a oeste/noroeste de Fortaleza, entre as coordenadas $02^{\circ} 53' 41''$ S - $39^{\circ} 43' 11''$ W e $03^{\circ} 47' 58''$ S - $38^{\circ} 38' 23''$ W (Figura 1).

Clima Regional

As condições do clima, ventos e ondas na região mantêm uma estreita relação com o processo de deslocamento ou migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e com as condições meteorológicas no Hemisfério Norte. Esta zona ZCIT atua no controle de um forte ciclo estacional com periodicidade anual associada às mudanças das estações climáticas. Esta zona se desloca mais para o norte durante o inverno austral (entre agosto e outubro) e mais para sul, durante o verão austral (março a abril) (Figura 2).

Sua faixa de movimentação é marcada pela convergência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste. Durante os meses de dezembro a abril a ZCIT se desloca no sentido meridional, período caracterizado como a estação de chuvas na região, com a incidência mais frequente dos alísios de NE. De julho a novembro a ZCIT se desloca gradativamente para o norte, afastando-se do Equador, período em que as chuvas começam a diminuir até caracterizar-se o período de estiagem. Ao mesmo tempo os alísios de sudeste/leste tornam-se mais efetivos, aumentando sua predominância em relação aos de nordeste.

Este comportamento ou padrão climático estacional é bastante influenciado pelo fenômeno "El Niño" que, ao favorecer uma posição da ZCIT mais ao norte e por um maior período de tempo, prolonga a vigência da estação seca.

Das ondas incidentes na região, as do tipo "sea" (período de 1 a 9s) representam cerca de 72% das ocorrências, enquanto as consideradas do tipo "swell" (período de 10 a 20s) compreendem 28%. Do total das ondas, 60,6% apresentaram direção entre 46 a 120° Az, das quais, a mais frequente durante o ano de 1996 foi de 90° Az.

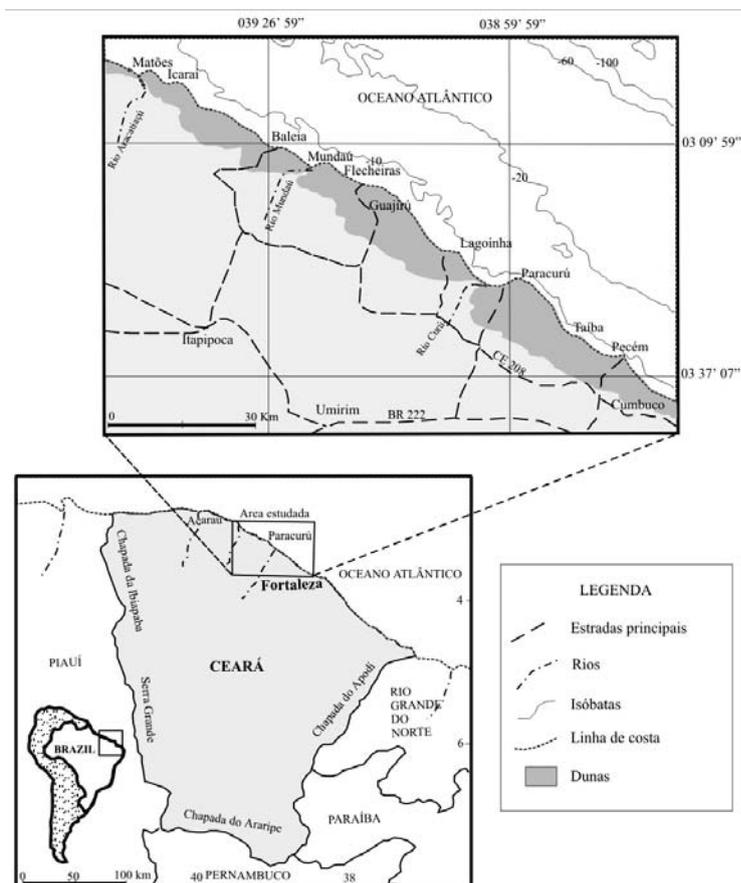


Figure 1 - Mapa da área estudada.

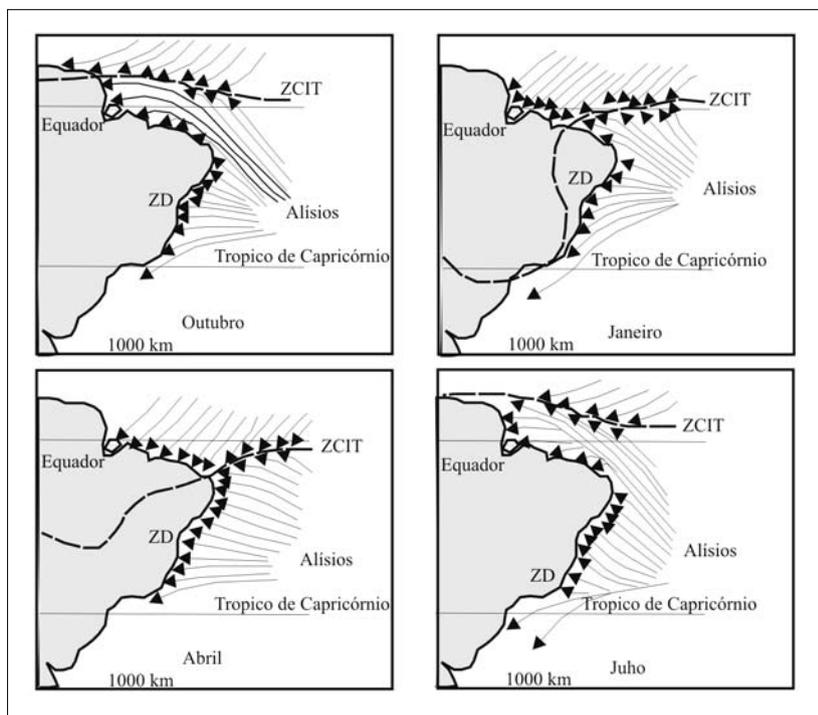


Figura 2 - Síntese da movimentação da ZCIT e da ZD e padrões de vento associados. Modificado de Martin *et al.* (1998).

O regime de marés na região pode ser caracterizado como de meso-marés com periodicidade semi-diúrna.

Geologia

A geologia da área estudada compreende um empilhamento estratigráfico representado, na base, por unidades Pré-Cambrianas, e encimadas por seqüências cenozóicas constituídas por ocorrências de vulcanismo terciário, ampla cobertura de depósitos terciário-quadernários da Formação Barreiras, depósitos colúvio-eluviais e unidades quadernárias, representadas por depósitos eólicos, praias, fluviais, flúvio-lacustres e lacustres.

Fisiografia Costeira

A fisiografia litorânea da região pode ser enquadrada, com algumas modificações, no modelo de "headland-bay beach" de Yasso (1965). Apresenta como característica principal o desenvolvimento de uma forma plana côncava voltada para o mar, resultante dos processos de erosão causados por refração, difração e reflexão de ondas dentro da zona de sombra atrás do promontório. Esta fisiografia pode ser dividida em duas partes principais: (1) segmento de maior curvatura, correspondendo à porção imediatamente a sotamar do promontório, e (2) segmento de menor curvatura, que abrange desde o final da primeira parte ao início do promontório seguinte (Figura 3).

Energia das Ondas - parâmetros e procedimentos

Uma vez que a energia das ondas, segundo Davies (1972), é proporcional ao quadrado da sua altura, então a dispersão de sedimentos poderá ser relacionada ao processo de refração das ondas, o qual se caracteriza como o principal mecanismo controlador das mudanças na sua altura ao longo da linha de costa.

Para o estudo da distribuição de energia das ondas objetivando principalmente uma caracterização geral dos processos, foi utilizado um método gráfico baseado na aplicação de técnicas clássicas de confecção de diagramas de refração de ondas, sistematizado pelo CERC (1984).

A percentagem de incidência anual das ondas foi calculada a partir das estatísticas publicadas por Hogben & Lumb (1967), cujas direções principais podem ser correlacionáveis às médias das direções dos ventos, uma

vez que na região dominam ondas do tipo "sea" as quais são geradas localmente.

A escolha das direções de onda mais importantes foi embasada no percentual de incidência de cada direção, mas também se levaram em consideração observações de campo e critérios definidos pela morfologia e disposição geográfica da linha de costa. Isto se deve ao fato de algumas direções de onda, mesmo apresentando um baixo percentual de incidência ao longo do ano, poderem produzir significativos processos erosivos e/ou deposicionais em determinados trechos da região costeira.

A importância da direção para as condições de águas profundas, avaliada com base no número de observações foi estipulada em um limite acima de 500 ocorrências para cada direção de onda. Entre-

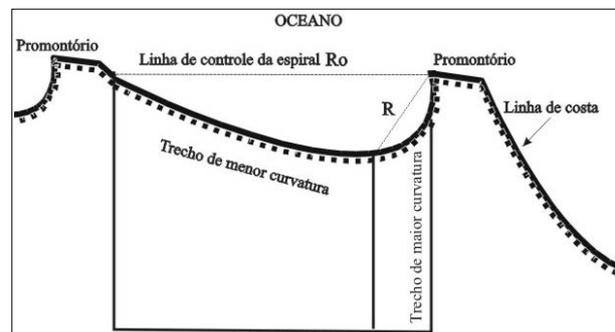


Figura 3 - Modelo conceitual da fisiografia costeira em espiral na área estudada. R = raio da espiral (modificado de Yasso, 1965).

tanto, o intervalo com direção N350 a N10°, apesar de apresentar valor de somatório inferior ao limite estabelecido, apresenta relevância quanto à sua direção de incidência em relação a conformação da linha de costa e à dinâmica costeira. Por este motivo, os valores referentes a esse intervalo foram somados àqueles do fator de direção mais próximo (em torno de N20°) para compor os diagramas de direção N25°. As demais direções foram selecionadas com base no cálculo dos percentuais de incidência superior a 7% do somatório total de todas as principais direções.

Para a construção dos diagramas de refração, portanto, utilizaram-se as principais direções de ondas selecionadas, com suas respectivas alturas e períodos, as quais estão sintetizadas na Tabela I.

Tabela I - Características das ondas selecionadas para os cálculos da intensidade da deriva.

Direção	Período (s)	Altura de onda (m)
N25°	5,0	1,0
	6,5	1,5
N60°	5,0	1,0
	6,5	1,5
N90°	5,0	1,0
	6,5	1,5

Os diagramas de refração representam a determinação de sucessivas posições das frentes-de-onda num intervalo de tempo constante, sobre uma plataforma continental, até alcançar a linha de costa (Bascom, 1954).

Esta metodologia, em linhas gerais, representa as mudanças na direção e na altura de onda impostas pela refração, sendo estabelecidas graficamente pela construção dos respectivos diagramas. As ortogonais, que representam linhas normais à frente-de-onda, traçadas no diagrama, mostram a direção de propagação da energia.

Para a confecção dos diagramas de refração utilizaram-se dados batimétricos obtidos da carta náutica n.º 600 da DHN na escala 1: 316 680, reduzida para 1:100.000.

Apesar da técnica manual de elaboração dos diagramas de refração não contemplar a difração de ondas, o que pode representar um importante processo modificador da direção e comportamento das ondas, seus resultados tem sido considerados relevantes para o estudo da distribuição de energia das ondas em regiões costeiras. Por outro lado, a ausência de ilhas favorece a aplicação dos diagramas de refração para a maior parte da região estudada, embora a presença de promontórios produza células de difração localizadas.

O diagrama de refração construído para as ondas de N25° com período de 5 s mostra ortogonais que incidem ao longo do trecho estudado, principalmente de forma perpendicular à linha de costa. As ondas de N25° com período de 6,5 s apresentam um maior número de trechos onde as ortogonais divergem ou convergem, gerando respectivamente trechos de maior e menor concentração de energia (Figura 4).

As ortogonais das ondas de N60° com período de 5 s são mais retilíneas que as ondas de N60 com período de 6,5 s. As primeiras sofrem pouca refração e mantêm um direcionamento geral para SSW. A maior diferença entre elas está no fato das ondas de N60° com período de 6,5 s sofrerem maior refração e apresentarem alternadamente trechos de maior convergência, significando o desenvolvimento de faixas com concentração de energia, associadas com outras de divergência de ondas, o que significa uma dissipação de energia para estes (Figura 5).

As ortogonais das ondas de N90° com períodos de 5 e 6,5 s sofrem mais refração ao longo de sua trajetória do que as anteriores, e os processos de concentração e dissipação de energia com relação aos períodos das ondas analisadas são semelhantes ao que se verifica para as outras direções de ondas (Figura 6).

Sentido e Intensidade da Deriva

Ao alcançarem a zona litorânea, além de dissiparem sua energia em função da interação com o fundo, as ondas também geram correntes costeiras. A corrente longitudinal (*longshore current*) e a deriva de praia (*beach drift*) compõem a deriva litorânea de sedimentos (*longshore drift*) (Komar, 1976 e 1998). A direção e magnitude dessa deriva estão relacionadas, respectivamente, à direção de aproximação da onda em relação à linha de costa e à sua energia que, de acordo com Davies (1972), é proporcional ao quadrado da altura. Neste sentido, para uma energia constante a quantidade máxima de material transportado depende do ângulo com que a onda incide na linha de costa. Conseqüentemente, o aumento ou a diminuição no valor deste ângulo implicará em elevação ou decréscimo da capacidade de transporte.

A intensidade da deriva, segundo Komar (1976 e 1998), está relacionada com o ângulo de incidência das ondas, segundo a expressão $Y = \sin \alpha \cdot \cos \alpha$, onde α é o ângulo que a frente-de-onda faz com a linha de costa.

Em função de seus padrões de convergência e divergência, as ondas apresentam diferentes alturas ao longo da costa. Segundo este conceito, a intensidade do potencial da deriva por unidade de área da

antepraia foi calculada utilizando a expressão $X = Y \cdot H^2$ (número adimensional), onde H é a altura da onda estimada ao longo da costa (Bittencourt *et al.*, 1999).

As alturas das ondas ao longo da linha de costa (H) foram definidas com base no coeficiente de refração (K), obtido diretamente dos diagramas de

refração, sendo $K = (b_0/b)^{1/2}$ e $H = H_0 K$, onde b_0 é a distância entre dois raios de ondas adjacentes ou ortogonais às frentes-de-onda, em condições de águas profundas e b , a mesma distância medida em águas rasas, sendo H_0 a altura de onda em águas profundas (Bascom, 1954) – ver Figura 7.

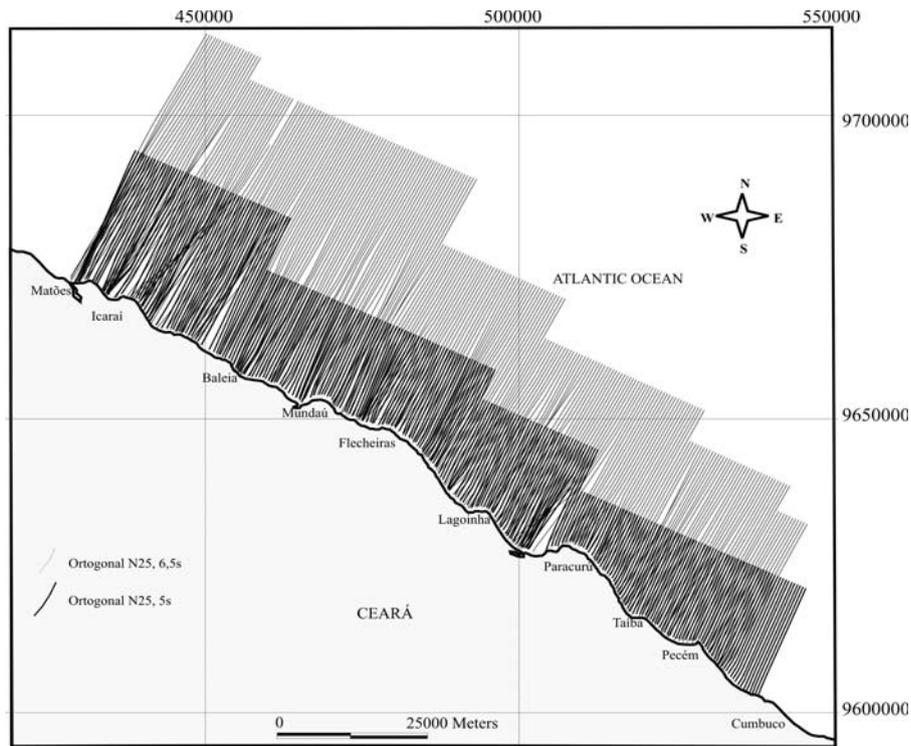


Figura 4 - Diagramas de refração de ondas com direção de propagação N25° e períodos de 5 s e 6,5 s.

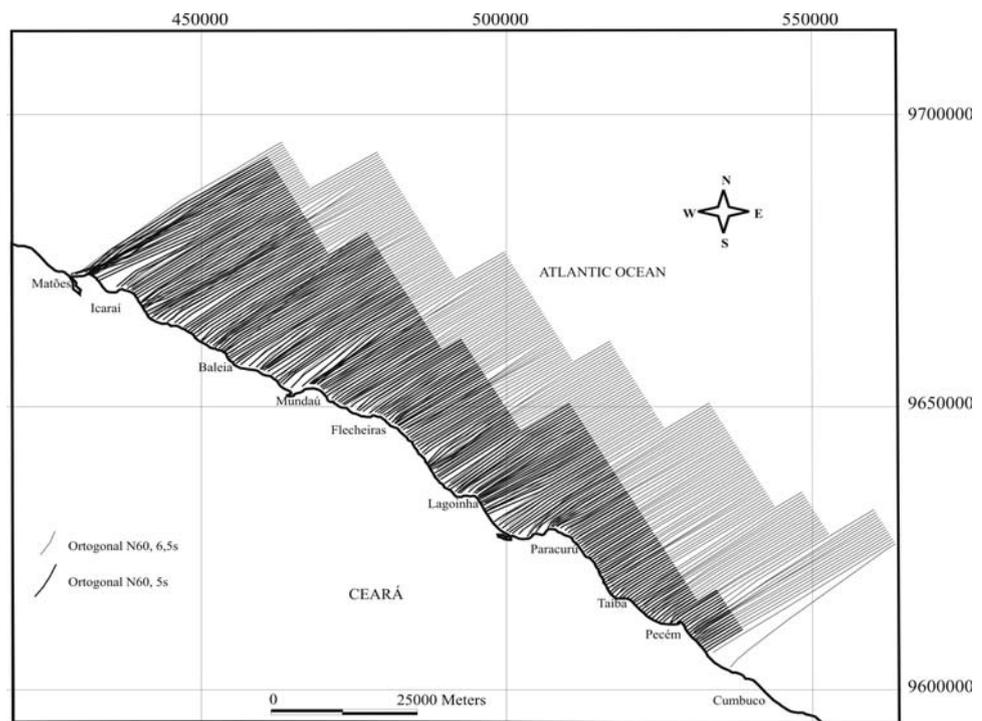


Figura 5 - Diagramas de refração de ondas com direção de propagação N60° e período de 5 s e 6,5 s.

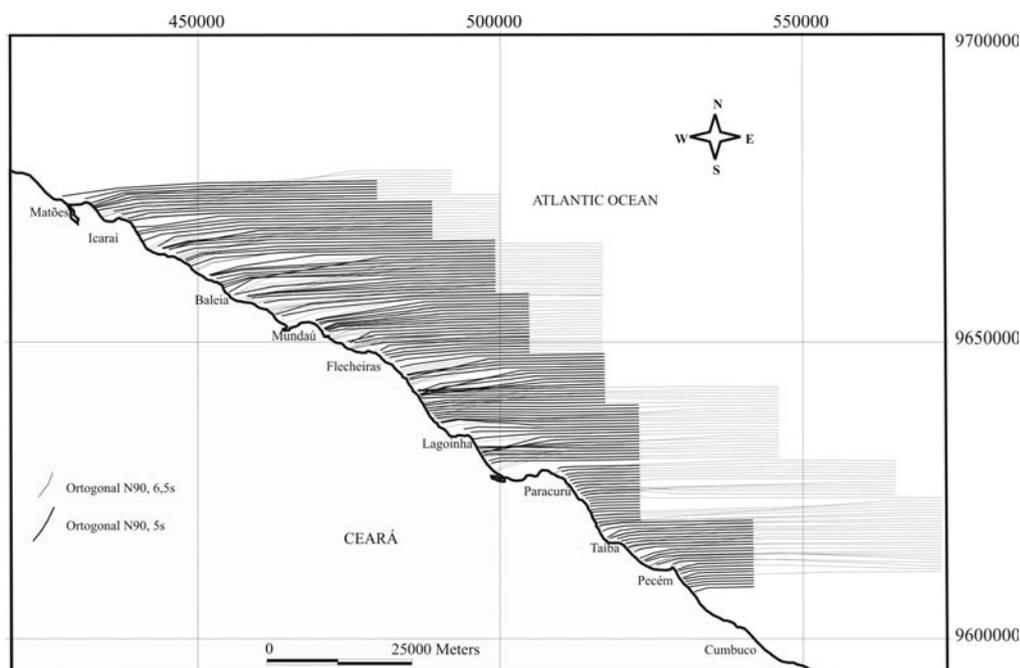


Figura 6 - Diagramas de refração de ondas com direção de propagação N90° e período de 5 s e 6,5 s.

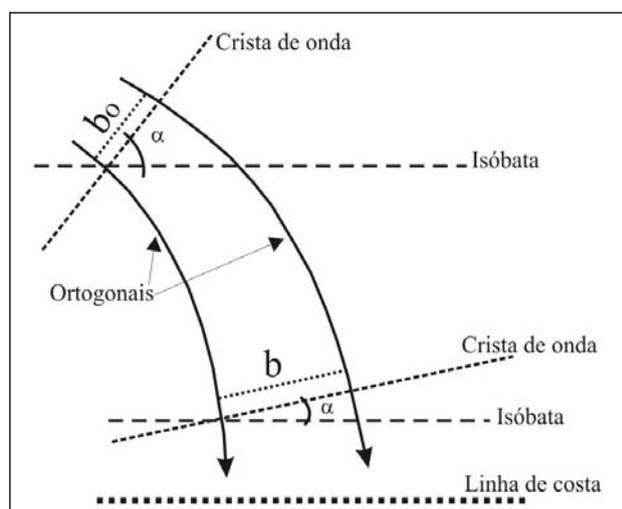


Figura 7 - Divergência de raios de onda como resultado do processo de refração: b_0 e b representam as distâncias entre os dois raios-de-onda adjacentes, respectivamente, em águas profundas e ao longo da costa. Modificado de Komar (1998).

Para a execução dos cálculos de intensidade do potencial de deriva, foi preciso determinar-se uma direção principal para o alinhamento dos trechos do litoral. Uma vez que a faixa litorânea estudada é relativamente longa, foi necessário segmentar a linha de costa em intervalos que possam ser representados por linhas retas, resultando na individualização de 31 segmentos (Figura 8).

Para cada segmento foram medidos, diretamente nos diagramas de refração, os ângulos que os raios de ondas incidentes formaram com a linha de

costa. Para a execução dos cálculos assumiu-se que o valor médio destes ângulos é significativo para cada segmento.

Para o cálculo das alturas das ondas nas regiões onde as ortogonais se cruzam, desenvolvendo as zonas de "caustics", adotou-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, assumindo que a energia contida num feixe de raios é distribuída dentro dos limites deste feixe, independente da sua trajetória. Em algumas situações, devido à mínima ou quase ausência de incidência de raios, impossibilitando o cálculo das alturas, adotou-se o procedimento de calcular uma altura média para um conjunto de dois ou mais segmentos.

A intensidade da deriva ponderada foi calculada multiplicando-se a sua intensidade pelo percentual de incidência anual das ondas. A deriva efetiva foi calculada subtraindo-se a deriva secundária da deriva dominante.

A análise da intensidade potencial da deriva mostrou que, para as ondas de N25°, com períodos entre 5 e 6,5 segundos, desenvolve-se uma deriva de sentido predominantemente para SE. Para este sentido de propagação de onda, apenas nos segmentos 10, 12, 13, 19, 21, 22, 25, 28, 30 e 31 (Figura 9) a deriva dominante ocorreu no sentido de NW. Estes segmentos compreendem trechos de costa caracterizados, em geral, por feições do tipo promontório ou núcleos centrais de embaixamentos na forma de espiral. Apenas o segmento 10 está posicionado na porção final do modelado em espiral, ou seja, a barlar do promontório subsequente. Ressalta-se, entretanto, que este último trecho é caracterizado, no geral, pela inci-

dência de ondas com cristas paralelas a sub-paralelas à linha de costa, conseqüentemente sem desenvolver deriva, ou formando uma deriva no sentido de NW. Adicionalmente, a inversão do sentido da deriva no segmento 10 pode ser conseqüência da formação de barras e/ou bancos de areia verificados próximo à embocadura do Rio Curu, município de Paracuru, Ceará.

As ondas de N60°, com períodos de 5 e 6,5 s, desenvolvem uma deriva predominantemente no sentido de NW (Figura 10). Apenas os segmentos 1, 6 e 26 apresentaram inversão no sentido da deriva. Todos estes três segmentos estão situados no trecho entre a porção final do modelado em espiral e o início de promontório seguinte.

Figura 8 - Segmentação da linha de costa da área estudada em trechos retilíneos.

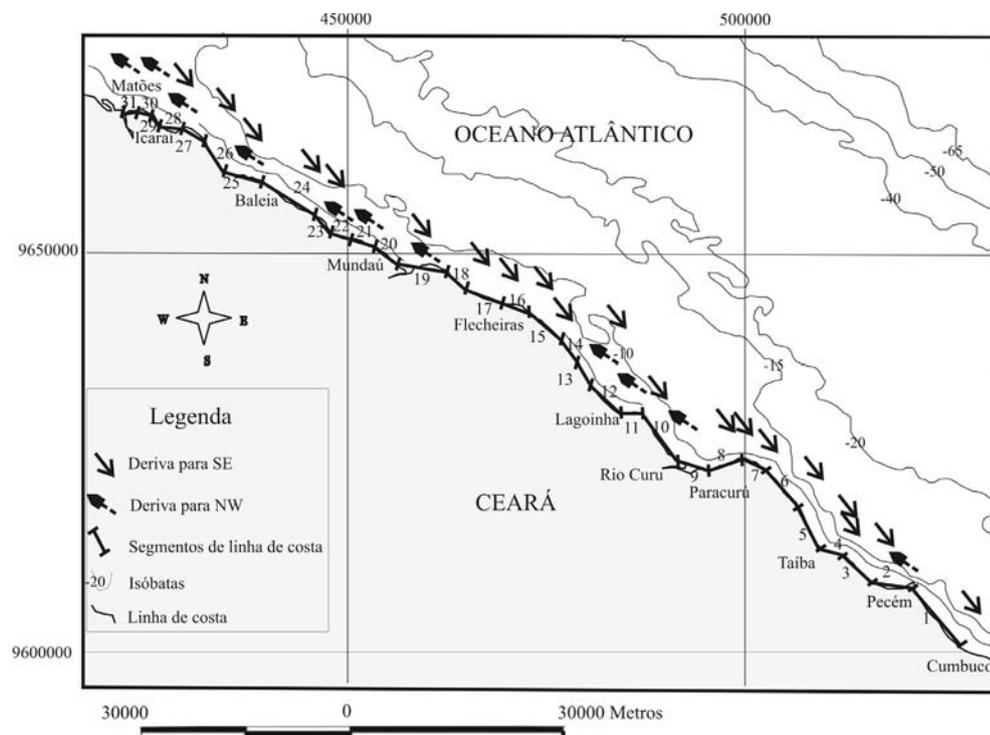
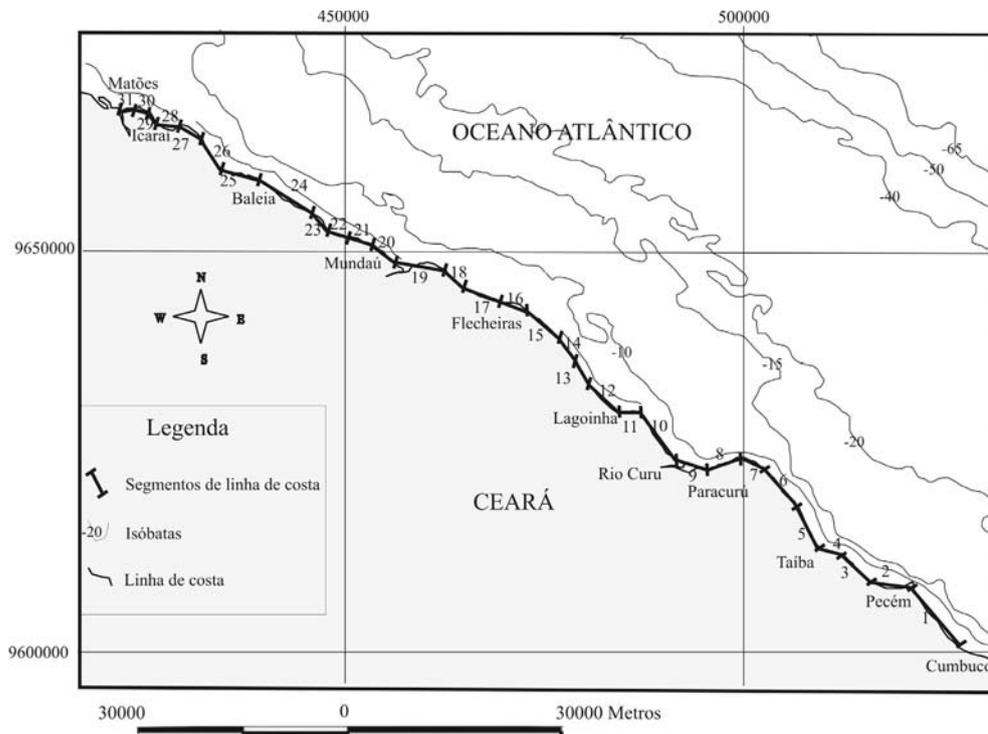


Figura 9 - Sentido da deriva potencial gerada por ondas de direção de propagação N25° e períodos de 5 e 6,5 s.

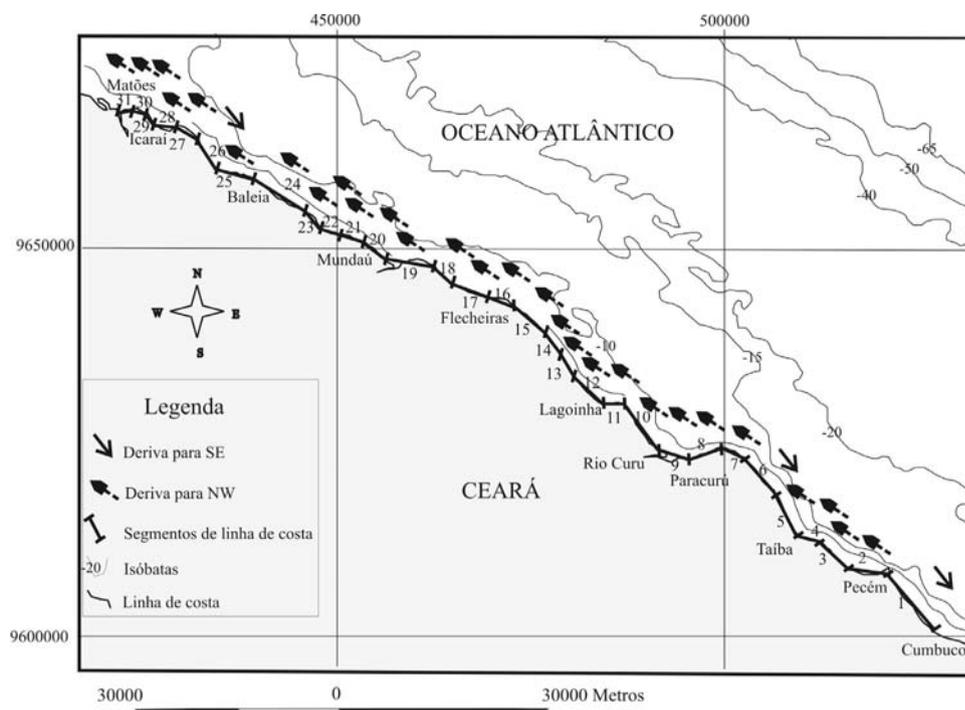


Figura 10 - Sentido da deriva potencial gerada por ondas de direção de propagação N60° e períodos de 5 e 6,5 s.

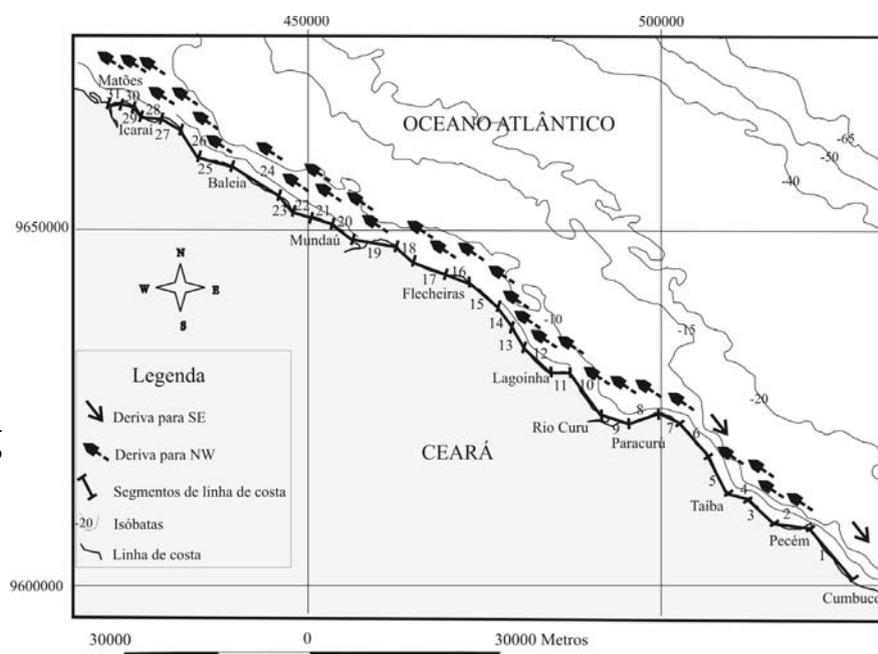


Figura 11 - Sentido da deriva potencial gerada por ondas de direção de propagação N90° e períodos de 5 e 6,5 s.

As ondas de direção N90°, com períodos entre 5 e 6,5 s (Figura 11), desenvolvem uma deriva no sentido dominante para NW. Entretanto, em alguns trechos da costa suas ortogonais, muitas vezes, desenvolvem um ângulo de 90° com a linha de costa. Nestes segmentos, portanto, não ocorre geração de deriva litorânea ou esta é bastante reduzida. Isto foi observado nos segmentos 9 e 10 para ondas provenientes da direção N90° com período de 6,5 segun-

dos. Estes segmentos correspondem ao trecho da embocadura do Rio Curu.

Com base nos diagramas de refração, apresentados nas Figuras 4 a 6, calculou-se o sentido e a intensidade da deriva litorânea potencial efetiva, considerando-se todas as direções de ondas. Identificou-se, desta forma, o sentido de SE para NW, como a direção predominante ou efetiva da deriva litorânea. Entretanto, nos segmentos 1, 6 e 26 (Figura 12), foi observado um

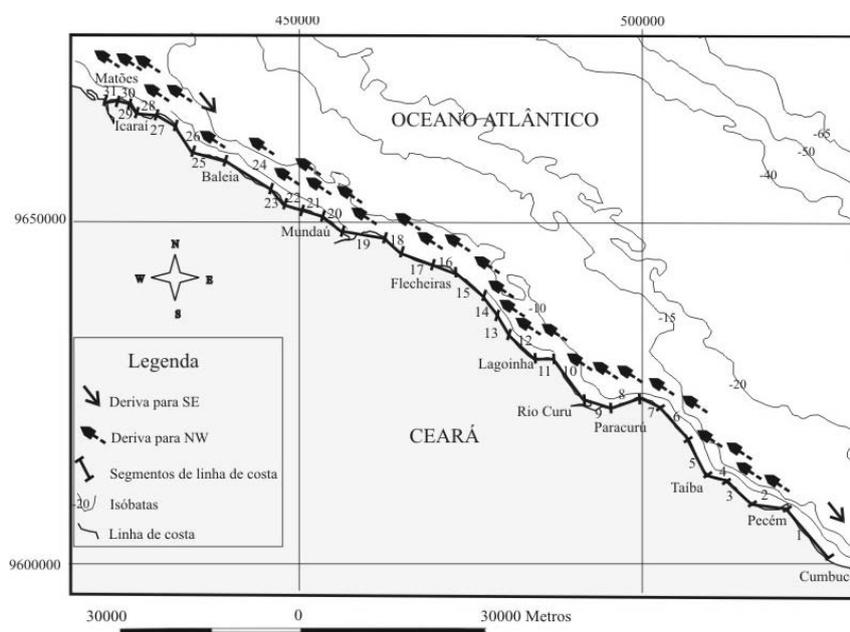


Figura 12 - Intensidade e sentido da deriva litorânea potencial efetiva na área estudada.

predomínio do sentido de deriva de NW para SE. Estes segmentos representam faixas da linha de costa caracterizadas como trechos inseridos entre o limite final da morfologia na forma de espiral e o início do promontório seguinte. Determinou-se ainda uma sensível diminuição da intensidade da deriva efetiva em praticamente todos os segmentos localizados nos trechos da linha de costa com tais características.

CONCLUSÕES

Os cálculos da intensidade e sentido da deriva litorânea demonstraram sua maior efetividade no sentido de SE-NW, induzida principalmente pelas ondas do tipo "sea" de N60° e N90°. Secundariamente, mas não de menor importância, desenvolve-se uma deriva no sentido de NW para SE, resultante basicamente da influência de ondas de N25°. A intensidade da deriva é variável para os diferentes trechos da linha de costa.

A refração das ondas é responsável pela maior parte dos processos erosivos e transporte de sedimentos verificados ao longo da linha de costa. Os trechos de convergência das ortogonais correspondem ao aumento na intensidade da deriva, consequentemente, gerando trechos de erosão, enquanto as divergências nos feixes das ortogonais correspondem à diminuição na intensidade da deriva e respectiva geração de deposição, aspectos confirmados em campo. Entretanto, a diminuição da intensidade da deriva desenvolvida na porção imediatamente adjacente aos promontórios, corrobora para uma inter-

pretação de que a erosão desenvolvida nestes trechos possa ser resultante principalmente dos processos de difração das ondas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bascom, W.J. The control of stream outlets by wave refraction. *J. Geol.*, v.62, p. 600-605, 1954.
- Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Martin, L. & Reimão, I.S. Padrões de dispersão de sedimentos ao longo da costa do Estado da Bahia, Brasil (no prelo).
- CERC. *Shore protection manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Washington, Vols. 1/2, p. 1 - 603, 1984.
- Davies, J.L. *Geographical variation in coastal development*, Longman Group Ltd., 204 p., New York, 1972.
- Hogben, N. & Lumb, F.E. *Ocean waves statistics*. National Physical Laboratory, Ministry of Technology, 263 p., London, 1967.
- Komar, P.D. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Inc., 429 p., Englewood Cliffs, 1976.
- Komar, P.D. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Inc., 2nd edition, 544 p., Englewood Cliffs, 1998.
- Martin, L.; Dominguez, J.M.L. & Bittenocurt, A.C.S.P. Climatic control of coastal erosion during a sea-level fall episode. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, 1998.
- Yasso, W.E. Plan geometry of headland-bay beaches. *J. Geol.*, v.73, n.5, p. 702-719, 1965.