

<sup>1</sup>Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>2</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>3</sup>Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>4</sup>Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul



# Hidrodinâmica e Sedimentologia das Praias Oceânicas do Rio Grande do Sul

*Elirio Ernestino Toldo Júnior<sup>1</sup>, Luiz Emílio Sá Brito de Almeida<sup>2</sup>,  
Luiz Roberto Silva Martins<sup>1</sup>, Nelson Luiz Sambaqui Gruber<sup>1</sup>, Carla Ennes de Barros<sup>1</sup>,  
João Luiz Nicolodí<sup>3</sup>, Leandro Farina<sup>4</sup>, José Carlos Nunes<sup>2</sup>*

## 1. INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul tem uma extensa costa com orientação uniforme NE-SW e uma pequena sinuosidade, ao longo de 630 km. Esta consiste de depósitos Quaternários inconsolidados que não recebem contribuições de areias modernas (Martins *et al.*, 1973), pois toda carga de tração transportada pelos rios é retida nas lagunas e outros ambientes costeiros, como por exemplo, a Lagoa dos Patos e a Lagoa Mirim, que se estendem por uma área de 13.750 km<sup>2</sup>, aproximadamente um terço da Planície Costeira do estado (Tomazelli e Villwock, 1992, Toldo *et al.* 2000). A Plataforma Continental é larga, com 150 a 200 km de extensão, apresentando profundidades máximas variando entre 100 e 140 m e suave declividade da ordem de 0,5 a 1,5m/km (Martins & Corrêa, 1996). A antepraia é extensa e rasa, com limite externo entre as profundidades de 10 e 15 m, e constituída por depósitos arenosos.

Os sedimentos do sistema praial – campo de dunas, pós-praia, zona de surfe e antepraia (Figura 1) – consistem principalmente de areias finas bem selecionadas; tamanho médio de 0.2 mm, (Martins, 1967; Martins & Corrêa, 1996, Siegle 1996; Nicolodi *et al.*, 2002; Gruber 2002), exceto ao longo de 60 km no Litoral Sul onde ocorrem sedimentos bimodais devido à presença de cascalho biotétrico (Calliari & Klein, 1993). Incidem sobre a costa ondulações geradas no Oceano Atlântico Sul e vagas geradas pelos fortes ventos locais de verão e primavera, provenientes de NE. Exceto pela passagem das frentes frias de S e SE, a agitação marítima é caracterizada por ondas de média a elevada energia, com altura significativa de 1,5 m e período entre 7 e 9 s. A maré astronômica é semi-diurna, com amplitude média

de 0,25 m, sendo que a maré meteorológica pode alcançar 1,20 m (Almeida *et al.*, 1997). A profundidade de fechamento é estimada em 7,5 m, calculada com base em dois conjuntos de dados de ondas coletados nos anos

de 1963 e 1996 no Litoral Norte do estado (Almeida *et al.*, 1999). Conseqüentemente, o transporte e a deposição dos sedimentos ao longo da costa são primariamente dominados pela ação da onda.



**Figura 1.** Vista aérea para o norte a partir da Praia de Capão da Canoa, onde se observa o perfil dissipativo - banco e cava longitudinal, o canal principal no meio da extensa zona de surfe, e a descontinuidade da primeira linha de quebra da onda nos locais onde ocorrem as correntes de retorno (Fotografia Sidnei Zomer, 1996).

## 2. AGITAÇÃO MARÍTIMA E MARÉS

Os dados analisados por Wainer (1963), indicam altura significativa mais frequente de 1,5 m e período médio de 8 s, observados entre 5 e 17 s, em Tramandaí.. Esta altura significativa ocorre associada tanto às vagas como às ondulações, e apresenta frequência de 23%, enquanto que as alturas significativas superiores a 2,0 e 2,4 m ocorrem durante 16% e 3% do tempo, respectivamente. A direção predominante de incidência foi dos quadrantes E e SE, e a

estimativa da onda máxima resultou na previsão de uma altura de 7 m para um intervalo de tempo de recorrência de 30 anos. Nos dados de ondas adquiridos do fundeio do ondógrafo entre Fevereiro e Outubro de 1996 (Figura 2), foi identificada uma altura significativa de 1,44 m e período significativo de 8,29 s (Almeida & Toldo, 1997).

Em estudos de arquivo de dados de ondas adquiridos entre outubro de 1996 e agosto de 1997 com ondógrafo direcional instalado próximo aos molhes de Rio Grande, a uma profundidade de 15 m ao norte da desembocadura da Lagoa dos Patos, Coli



**Figura 2.** Fundeio do ondógrafo direcional Dataweel a 18 m de profundidade na Praia de Tramandaí (Fotografia Luiz Emílio S. B. Almeida, 1996).

(2000) observou que a onda característica de curto prazo teve altura significativa entre 1 e 1,5 m, com frequência de 41% e período entre 5 e 6 s, com frequência de 73%. A direção de onda incidente de E, SE e S representam 99% das observações, sendo a direção de SE a predominante, com 58% dos registros. As situações de calmaria apresentam-se em geral com ondas menores que 0,5 m e correspondem a 1% do total dos registros. Com relação às alturas máximas, a média das maiores ondas possui 3,2 m e período de 7 s, provenientes de SE e frequência de 1%. A máxima onda individual registrada aconteceu em 8 de Junho de 1997, com registro de uma ondulação de 7,0 m e período de 11,8 s.

Estudos da maré astronômica foram conduzidos entre 1996 e 1997 através da instalação de marégrafo Anderaa, modelo WLR7, no trapiche da Petrobrás, localizado

na margem esquerda da barra do rio Tramandaí.

Segundo Almeida *et al.* (1997), com base em séries medidas em um curto período de tempo, a maré prevista neste local é do tipo mista semi-diurna, com valores de amplitude máximos da ordem de 0,32 m, ao passo que a altura média da maré astronômica é da ordem de 0,30 m. Além dos registros de campo, são publicadas informações sobre a amplitude das marés pela Diretoria de Hidrografia e Navegação. Estas publicações apresentam previsões de amplitudes máximas da ordem de 0,60 m, valor distinto daquele citado por Almeida (*op. cit.*).

A análise dos registros mostra grandes diferenças entre a maré prevista e a maré registrada, devido à influência dos fatores meteorológicos, principalmente, quando da passagem de frentes de baixa pressão que provocam elevações de nível da água. Estas



elevações, denominadas de maré meteorológica ou ressacas, atingem três vezes o valor dos níveis de preamar normais para a região, e além de causar a elevação ou abaixamento do nível do mar, podem causar o atraso ou adiantamento dos instantes de ocorrência das preamares e baixa-mares. Nestas condições, as preamares e as baixa-mares poderão ser mais altas ou mais baixas do que as alturas previstas.

Apesar de comuns nesta região, estas frentes frias raramente provocam elevações de níveis da água tão grandes como as que se verificaram em abril de 1997. No dia 07 deste mês, foi registrado um evento com elevação de 1,2 m do nível do mar associada à passagem de uma frente proveniente de S e SE.

Além dos estudos do campo ondulatório ao longo do litoral do estado, também foram desenvolvidas e aplicadas modelagens matemáticas para o estabelecimento do padrão de ondas na Lagoa dos Patos (Toldo *et al.*, 2000a) e no Lago Guaíba (Nicolodi, 2007). Com base em medidas de ventos durante todo o ano de 1988, observa-se que os ventos nordestes prevalecem no verão e primavera, e desta forma a direção das ondas dominantes no lado ocidental da laguna é NE e ENE com média das alturas de ondas significativas entre 0,5-0,7 m e períodos entre 2,7-3,3 s. No lado oriental da laguna os ventos prevalecentes são de WNW e WSW. Durante o inverno e outono, os ventos produzem as maiores alturas máximas na laguna com valores de 1,6 m e período de 4,8 s, e alturas de ondas significativas entre 0,4-0,8 m e períodos entre 2,4-3,4 s.

No Lago Guaíba as maiores ondas modeladas atingiram 0,55 m, principalmente quando de ventos soprando dos quadrantes S e SE e em intensidades superiores a 7 m/s. Em linhas gerais, neste corpo d'água, as ondas acompanham os padrões

de intensidade e direção do vento, atingindo os valores máximos aproximadamente entre 1 e 2 horas após os picos de suas velocidades.

### 3. PERFIL PRAIAL E CORRENTES LONGITUDINAIS

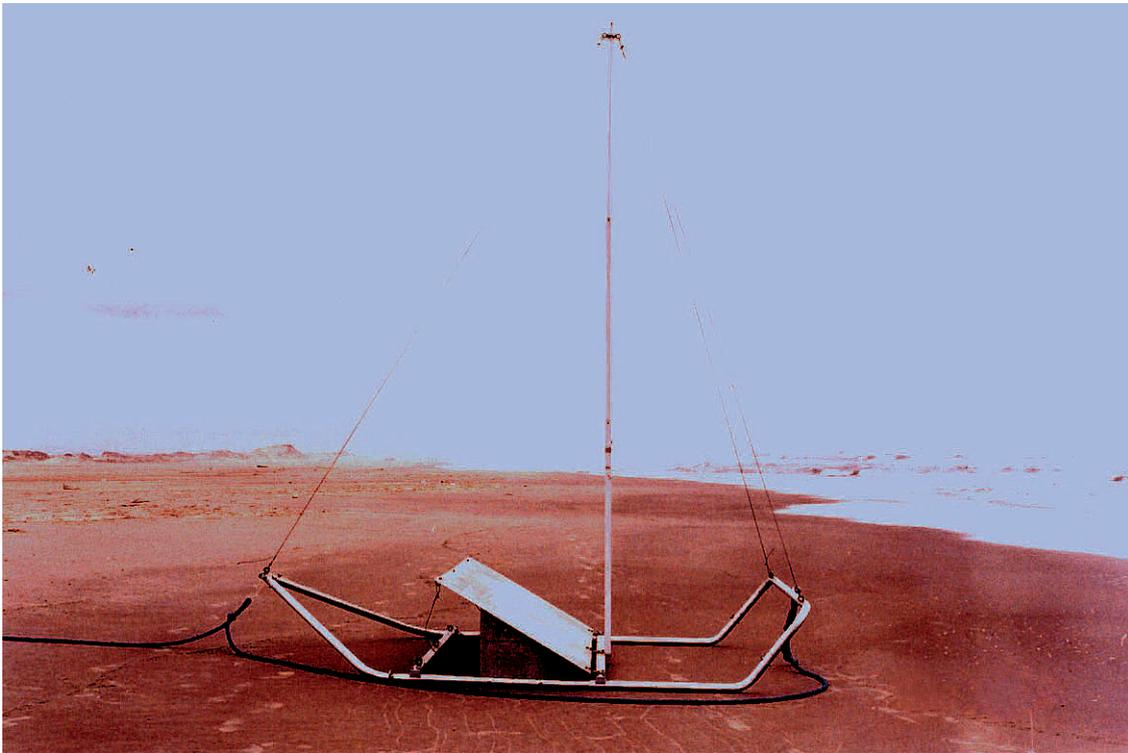
Dados coletados no campo durante a execução de projetos de pesquisa sobre a hidrodinâmica costeira, permitiram o estabelecimento da distribuição direcional, bem como das velocidades destas correntes para a praia de Tramandaí. Os dados de ondas coletados entre 1962 e 1963 indicam que as direções de aproximação das cristas das ondas são praticamente paralelas à costa, sendo que 60% dos ângulos de incidência perpendiculares à linha de praia ocorrem desde 19° N a 11° S, caracterizando a obliquidade das ondas e conseqüentemente o padrão de correntes para NE ou SW que se desenvolvem no interior da zona de surfe, ou seja, na faixa compreendida entre a primeira linha de rebentação e a linha de praia.

Os dados específicos recentes da direção da corrente longitudinal foram obtidos junto a Plataforma de Pesca na praia de Tramandaí, diariamente às 08:00 h, 12:00 h e 16:00 h, desde Janeiro de 1996. Os resultados indicam a existência de correntes longitudinais distribuídas de modo muito regular, tanto para SW, como para NE, num padrão claramente bidirecional. Segundo Nicolodi *et al.* (2000), entre 1996 e 1997 ocorreu um pequeno domínio da corrente para SW, com valores médios de 62,8 e 54,8%, respectivamente, enquanto que entre 1998 e 1999 observou-se uma inversão, com a corrente para NE apresentando valores da ordem de 54 e 51,2%. Também, pode-se afirmar que essa bidirecionalidade

tem uma componente sazonal, governada pelas variações dos parâmetros climáticos. Nos meses de Outubro à Março é marcante o predomínio de correntes para SW. Entre os meses de Maio e Agosto o domínio é das correntes para NE.

Medidas de velocidades das correntes longitudinais na zona de surfe da praia de Tramandaí, para ondas com altura de 1,79 m e ângulo de incidência de  $10^\circ$ , resultaram

em valores da ordem de 0,9 m/s (Toldo *et al.*, 1993). Esses valores mostram-se coerentes com os valores de velocidades previstos a partir do ângulo de incidência e altura da onda na rebentação. Essas correntes atingem as maiores velocidades ao longo do canal principal dentro da zona de surfe (Figura 1). A posição e a profundidade do canal têm sido mapeadas com emprego de trenó visto na Figura 3 (Martins *et al.*, 1998).



**Figura 3.** Trenó para medidas do relevo do fundo da zona de surfe, empregado em levantamentos das praias do litoral norte do estado (Fotografia Elírio Toldo Jr., 1997).

Com a migração dos bancos externo e interno para mar aberto, durante os eventos de tempestades, o canal principal pode alcançar profundidades superiores a 3 m, típica em perfis de praias dissipativas, comuns ao longo do litoral do estado (Calliari *et al.*, 2006). Sob essas condições, o canal se posiciona em média a 200 m da linha de praia. Ao contrário, com a migração dos

bancos em direção à praia, durante a incidência de ondulações com alturas inferiores a 1,4 m em média (Toldo *et al.*, 1999a), o canal principal apresenta profundidades menores que 3 m, e se posiciona próximo à linha de praia, por vezes junto a essa linha e com profundidades variáveis.

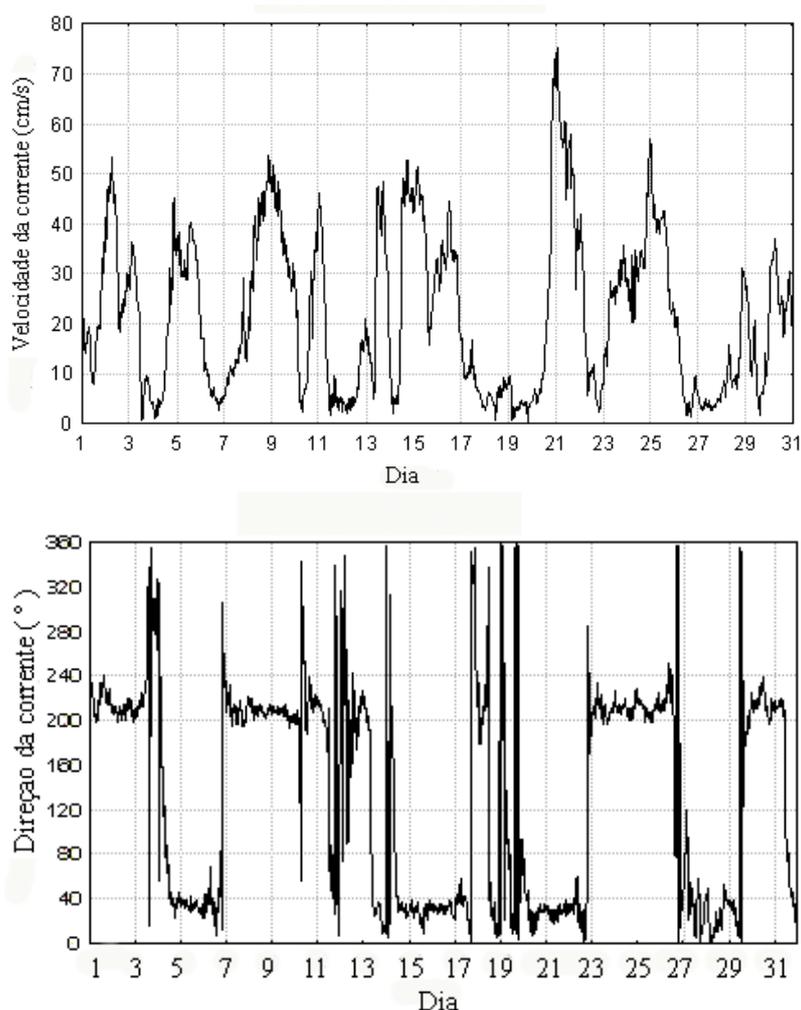


#### 4. CORRENTES COSTEIRAS

As correntes costeiras presentes além da zona de rebentação, ao largo, se constituem em um fenômeno importante para o litoral do Rio Grande do Sul, uma costa oceânica aberta e isenta de obstáculos à propagação destas correntes que podem ser induzidas pelos ventos locais e tanto pela maré astronômica como pela maré meteorológica. Registros de correntes costeiras por instrumentos foram obtidos durante a execução do projeto Estudos Ambientais em Áreas Costeiras e Oceânicas na Região Sul do País, quando foi reali-

zado fundeio de dois mini-correntógrafos SD 6000, a 18 m de profundidade, e correntógrafos posicionados a 5 e 15 m do fundo (Almeida & Toldo, 1997).

Os dados de direção e velocidade das correntes representam a dinâmica das interações dos ventos e das marés sobre as massas de águas costeiras, as quais respondem rapidamente a estas forçantes com as componentes de direções principais paralelas à costa e velocidades máximas de 75 cm/s (Figura 4), para as correntes de superfície em 1996. Segundo Almeida & Toldo (1997), as principais direções das correntes de superfície e de fundo apresentam componentes com direções NNE e SW.



**Figura 4.** Intensidade e direção das correntes costeiras medidas a 5 m da superfície, em local com profundidade de 18 m, no mês de julho de 1996 (Almeida & Toldo, 1997).

## 5. MAPEAMENTO DAS ZONAS DE EROSIÃO E DEPOSIÇÃO

O mapeamento das mudanças da linha de praia é realizado ao longo de toda a costa com base em coleções de fotografias aéreas e levantamentos anuais com DGPS desde 1997. O plano para o levantamento da linha de praia com DGPS consiste em medir a posição do perfil longitudinal da linha da água, tomado-o como perfil representativo da posição da linha de praia. Em 1997, o trabalho de campo foi desenvolvido com um par GPS, modelo GARMIN 100 Personal Surveyors, com precisão de 10 e 3 m para os equipamentos que operavam no modo de navegação e no modo estático, respectivamente.

No trabalho de campo foi instalado um equipamento DGPS em um veículo que se desloca a uma velocidade de 50 km/h junto à linha da água, a uma velocidade de 50 km/h. Enquanto que outro equipamento GPS, no modo estático, foi posicionado em locais previamente estabelecidos na costa e separados 100 km um do outro, de modo a cobrir a área e incrementar a precisão dos dados. A taxa de aquisição para ambos os equipamentos foi de 5 s, a qual permitiu a geração de arquivos que após processados, estabeleceram uma linha do litoral com precisão de 3 m (Toldo *et al.*, 1999b; Toldo & Almeida, 2003a).

A linha da água adotada nos levantamentos de campo corresponde à linha de espraiamento da onda ou linha de *smash*. Para as praias oceânicas do Rio Grande do Sul, a linha está situada a aproximadamente 16 m do nível médio do mar, tendo em consideração as características de altura ( $H_o = 1,5$  m) e o comprimento da onda em águas profundas ( $L_o = 80$  m), bem como a declividade média da face praial (1/30). A Figura 5 mostra que essa feição é facilmente identificada

ao longo da praia monitorada. Entre todos os indicadores possíveis de serem empregados na área de estudo, a linha da água é o mais prático, principalmente, por causa de sua continuidade e também porque se constitui num indicador que possibilita a repetição das medidas. Segundo Morton & Speed, (1998, *apud*: Pajak & Leatherman, 2002), a principal desvantagem é que a linha não é um indicador morfológico. É um indicador que não mantém o mesmo plano horizontal ao longo do tempo. Os principais erros decorrentes desse modo de levantamento da linha de praia estão associados à amplitude das marés astronômica e meteorológica, ao *run up* e as variações da declividade da face praial.

A linha de praia, determinada em 1997, foi comparada com a linha de praia obtida da coleção de cartas do exército, escala 1:50.000, as quais são uma restituição de um levantamento aerofotográfico realizado em 1975. A análise temporal entre estes dados foi desenvolvida através de técnica de geoprocessamento usando software IDRISI (Clark University). Para a análise temporal desses 22 anos (1975-1997), não foram consideradas as variações menores que 20 m, por não se dispor de dados para controle das variações da altura da onda, maré e declividade da face praial durante os levantamentos.

Os resultados da análise temporal de 22 anos (1975-1997), mostraram que 442 km da linha de praia caracteriza-se pela retração, 173 km pela progradação e 6 km não apresentam variações significativas. Os processos erosivos, com taxas médias maiores que 80 m, estendem-se através de 257 km, enquanto que as áreas progradação apresentam pequenos valores (Toldo *et al.*, 1999b; Esteves *et al.*, 2002).





**Figura 5.** Levantamento da linha de praia com sistema de posicionamento global – GPS, fixado em um veículo que se desloca ao longo da linha de água associada ao espraiamento da onda (Fotografia Elírio Toldo Jr., 1998).

## 6. ESTIMATIVA DO TRANSPORTE LITORÂNEO

O trabalho realizado por Lima et al. (2001) teve por objetivo estimar quantitativamente o potencial de transporte longitudinal de sedimentos para a costa gaúcha, através da aplicação do método do fluxo de energia das ondas incidentes. O cálculo foi realizado ao longo de cada trecho de reta que represente a orientação predominante da linha de praia. A divisão dos 630 km de costa em oito trechos foi feita com base na linha de praia estabelecida em 1997 por DGPS, e o alinhamento utilizado foi o azimute da reta traçada.

A partir de um conjunto de dados sedimentológicos e morfológicos de perfis praias existentes, para estimar o coeficiente de proporcionalidade entre a energia das ondas e o transporte de sedimentos e de um

conjunto de dados de ondas obtidos em mar aberto, registrados por navios comerciais e organizados por Hogben e Lumb (1967), aplicou-se o Método do Fluxo de Energia (U.S. Army, 1984) para estimar o potencial de transporte litorâneo causado pelas ondas.

A estimativa matemática tem por base a fórmula do CERC, onde o cálculo do fluxo de energia paralelo à praia e a correspondente deriva litorânea são obtidos da relação empírica entre a componente do fluxo de energia da onda que entra na zona de rebentação e o peso submerso da areia em movimento (U.S. Army 1984). Ambos têm unidades de força por unidade de tempo, assim:  $I_l = K.P_l.s$ , onde  $I_l$  é a taxa de transporte,  $K$  é um coeficiente adimensional, e  $P_l$  o fluxo de energia paralelo à praia. Este modelo prediz uma variação significativa do fluxo de energia na zona de rebentação devido às pequenas mudanças nos

alinhamentos costeiros, e, por conseguinte, no potencial de transporte.

Em águas rasas, as ondas incidentes apresentaram a seguinte distribuição direcional: 30% e 9% provenientes do quadrante de NE e S, respectivamente. As ondas de NE são de menor altura, geradas por ventos locais, e são responsáveis por menos que 2% do transporte bruto de sedimento, enquanto que as correntes litorâneas geradas pelas ondulações incidentes do quadrante S exibem comportamentos episódicos de elevada energia e são responsáveis por mais que 30% do transporte de sedimento. Segundo Lima *et al.* (2001), a frequência dessas ondas e seu potencial de transporte levam a conclusão que são eventos raros e de elevado potencial erosivo. Em outras palavras, o grupo de ventos locais predominantes NE, NNE e ENE gera vagas com pequena capacidade de transporte e, mesmo com frequências consideráveis, não respondem por grandes modificações na linha de praia. Por outro lado, as ondas geradas por ventos dos quadrantes SSW, SW e WSW estão associadas a fenômenos de tempestades e são registrados com maior frequência nos meses de Inverno.

Segundo Tomazelli & Villwock (1992), uma deriva litorânea com direção resultante para NE é evidente em muitos dos depósitos costeiros presentes ao longo do litoral do Rio Grande do Sul, em particular nas desembocaduras dos sistemas lagunares. Os resultados da estimativa, obtidos do cálculo do potencial de transporte de litorâneo (Lima *et al.*, 2001), estão em acordo com as observações geomorfológicas descritas ao longo do litoral.

## 7. CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS PESADOS DAS PRAIAS DO LITORAL MÉDIO E NORTE

Existe também o registro da deriva litorânea, com resultante para NE, na composição das areias do pós-praia, ao longo de todo litoral médio. Barros *et al.* (2005), em estudos da concentração dos minerais pesados obtidos em amostras coletadas a cada 20 km nessas praias, identificou altas concentrações à barlamar nos segmentos praias subseqüentes do litoral médio e norte do estado.

A distribuição modal dos minerais pesados (MP) ocorre no intervalo de areia muito fina. Esta mineralogia é composta de: zircão, turmalinas, rutilo, ilmenita, magnetita, epidotos, silimanita, cianita, estauroлита, granadas, anfibólios, piroxênios e apatita.

A partir dos picos de concentração de MP é possível observar um decréscimo geral de sul (São José do Norte) para norte (Torres). Ao longo desta faixa litorânea observa-se também que a distribuição de MP pode ser agrupada em 5 faixas ou segmentos da linha de praia, do seguinte modo: Farol da Conceição (1), Farol de Mostardas (2), Farol da Solidão (3), Tramandaí (4) e Remanso (5).

Também, observa-se que cada segmento apresenta um decréscimo na concentração de minerais pesados, de sul para norte. A maior quantidade de minerais pesados encontra-se na faixa entre Mostardas e Estreito, com picos de 9,6% de MP no Farol da Conceição e 15% de MP no Farol de Mostardas. Entre Cidreira e São Simão, o pico é de 4,5% de MP, junto ao Farol da Solidão. Entre Torres e Tramandaí, o pico é de 3,2% de MP, em Remanso.

Cada um destes segmentos mostra uma forte correspondência com a mudança



de alinhamento da linha de praia. A partir dos teores de pesados, percebe-se, de sul para norte, a existência de 5 picos de concentração. Estes picos de minerais pesados coincidem com os mesmos locais onde foram identificadas mudanças no alinhamento da costa e na taxa da capacidade de transporte longitudinal.

Nestes segmentos, Lima *et al.* (2001) observou que existe uma diferente taxa de deriva litorânea, controlada pelo ângulo de incidência da onda, principalmente, aquela proveniente do quadrante sul. Também foi observado que ao final de cada alinhamento ocorre um engarrafamento da deriva litorânea, de modo a produzir extensos depósitos arenosos no sistema praial (Toldo *et al.*, 2003b). Nestes locais foram registradas as menores concentrações de minerais pesados, ao passo que no início do segmento seguinte, devido à aceleração da deriva litorânea, são observados campos extensos de processos erosivos e que neste trabalho identifica-se através do elevado teor de minerais pesados.

Estes picos de concentração de minerais pesados encontram-se nas áreas de erosão de praia, medida nos últimos 25 anos (Toldo *et al.*, 1999b). Estes locais coincidem com os maiores teores de minerais pesados. Estes picos de minerais pesados são encontrados nos locais de maior taxa de erosão, demonstrando que a concentração dos pesados está intimamente relacionada a áreas de erosão atual.

Soma-se a erosão por deriva litorânea à concentração da energia de ondas (Calliari *et al.*, 1998; Calliari & Speranski, 2002; Barletta & Calliari, 2003) pelo processo de refração, presentes nos segmentos de Mostardas e Farol da Conceição. Este fenômeno amplifica o processo de erosão e a concentração de minerais pesados. Estes processos de curto período associados à deriva litorânea e refração de ondas, podem estar

atuando sobre o litoral desde o último evento transgressivo, ao longo dos últimos 5ka (Dillenburg *et al.*, 2000).

## 8. VARIABILIDADE DA ANTEPRAIA NO LITORAL MÉDIO

A topografia da antepraia ao longo do litoral médio consiste de uma larga área com superfície de fundo plana e declividade suave, da ordem de 1:100. Essa uniformidade morfológica é modificada nas proximidades das praias de Mostardas e Dunas Altas, onde a largura da antepraia passa dos seus valores médios de 1 km para mais de 3 km. Essas duas praias estão localizadas, onde ocorre inflexão da linha de costa, ou seja, mudança do alinhamento da praia entre 10° e 12° (Figura 5). A isóbata de 10 m foi utilizada como limite externo da antepraia. Esse limite foi definido com base no cálculo da profundidade de fechamento de 7,5 m (Almeida *et al.*, 1999) e nos dados batimétricos disponíveis da carta do Ministério da Marinha de 1963.

O mapeamento das zonas de erosão e deposição, tanto em praias específicas, como ao longo do litoral médio, mostra extensivo processo de retração da linha de praia (Alvarez *et al.*, 1981; Tomazelli *et al.*, 1996; Calliari *et al.* 1996, Toldo *et al.*, 1999b; Tozzi, 1999; Barleta, 2000; Esteves *et al.*, 2002; Dillenburg, 2004). As elevadas taxas de erosão nesses trechos podem estar em parte, relacionadas ao fato do litoral médio estar mais expostos ao ataque das ondas provenientes do quadrante S, o que resulta num incremento no fluxo de energia paralelo à praia. Também, esse fluxo de energia e o relacionado ao transporte de sedimentos paralelo à praia, decrescem de sul para o norte com valores de 2,9 milhão m<sup>3</sup>/ano, 2.3 milhão m<sup>3</sup>/ano e 1,5 milhão m<sup>3</sup>/ano, a

sul de Mostardas, a sul de Dunas Altas e a norte de Dunas Altas, respectivamente (Lima *et al.*, 2001). Dette (2001), em estudos dos processos morfológicos e sedimentológicos ao longo de 40 km de praia no mar Báltico, identificou um acúmulo de sedimentos em locais de inflexão da linha praia. A redução do fluxo de transporte, devido a mudanças no alinhamento da costa, implica num engarrafamento da deriva litorânea. Isto significa que parte dos sedimentos provenientes de barlamar serão depositados nestes locais de inflexão e parte poderá ser redirecionada para a antepraia.

O processo descrito por Dette (2001) aplica-se ao balanço dos sedimentos ao longo do litoral médio. Desse modo, parte do volume de sedimentos que foi erodido a sul não é transferido para o trecho adjacente, à sotamar, e se deposita no sistema praial. Aproximadamente, 0,6 e 0,8 milhões de m<sup>3</sup>/ano ficam retidos nas inflexões da linha de praia nas praias de Mostardas e Dunas Altas, respectivamente (Figura 5). Essas deposições geram modificações espaciais com amplas mudanças volumétricas, tanto do campo de dunas costeiras quanto da antepraia.

Além desses elementos morfológicos e sedimentológicos, foram identificados processos hidrodinâmicos específicos associados com as mudanças no alinhamento da costa, como descrito a seguir. Análises de imagem de satélite nessa área revelam a presença de um padrão de circulação de curto período sobre a antepraia e sugerem que, em algumas instâncias, esta corrente pode conduzir para a antepraia, por difusão, parte dos sedimentos que se encontram em suspensão dentro da zona de rebentação. Um jato costeiro episódico pode estar associado a esse processo de difusão (Toldo *et al.*, 2003b; Nicolodi *et al.*, 2003), e sua ocorrência e evolução está associada à passagem de frentes frias, principalmente durante o

inverno. Segundo Tozzi (1999), a pista de vento formada no posicionamento da zona Polar Atlântica e o gradiente da Alta Tropical direcionam os ventos de sul, gerados nos sistemas frontais, sobre o litoral da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul. As características desse padrão de circulação, intensificado por ventos fortes de sul e sudeste, sobre a antepraia consiste de dois segmentos, um jato direcionado para nordeste e, nessa extremidade, uma larga pluma de dispersão com giro no sentido horário.

Uma fração da carga de suspensão proveniente da zona de surfe é incorporada pela antepraia todos os anos, em condições de desenvolver um banco de areia de extensões como aquele observado pela projeção da isóbata de 10 m em direção ao mar aberto, nas adjacências das praias de Mostardas e Dunas Altas. Esses largos bancos de areia têm sido descritos como *shoal-retreat massifs* por Swift & Sears (1974, *apud*: Dyer e Huntley 1999).

Também, o processo físico que controla a formação e evolução do jato costeiro não foi explorado completamente, mas boa correlação é encontrada entre a área de crescimento sobre a antepraia, por mais de 2 km para mar aberto, e a extensão do jato costeiro sobre essa área, como observado na imagem de satélite.

Outras duas correlações, também reforçam a mecânica desse processo de progradação. Barros *et al.* (2005) observaram as mais baixas concentrações de minerais pesados nas adjacências das inflexões da linha de praia, locais onde ocorre a redução do fluxo de energia das ondas, deposição de sedimentos e progradação da zona costeira. Absalonsen & Toldo (2005) verificaram a progradação desses locais com novos levantamentos de posição da linha de praia.



## 9. VARIABILIDADE DO CAMPO DE DUNAS COSTEIRA NO LITORAL MÉDIO

Em artigo publicado em 2000, Tomazelli *et al.* descreveram os depósitos de praia oceânicos associados ao sistema laguna-barreira IV, a barreira mais recente da planície costeira do Rio Grande do Sul, formada durante o Holoceno. Esse sistema associado ao da laguna-barreira III, separam a Lagoa Patos do oceano. Segundo esse autor, sobre o sistema laguna-barreira IV desenvolve-se extenso campo de dunas costeiras, formadas, principalmente, por dunas barcanóides.

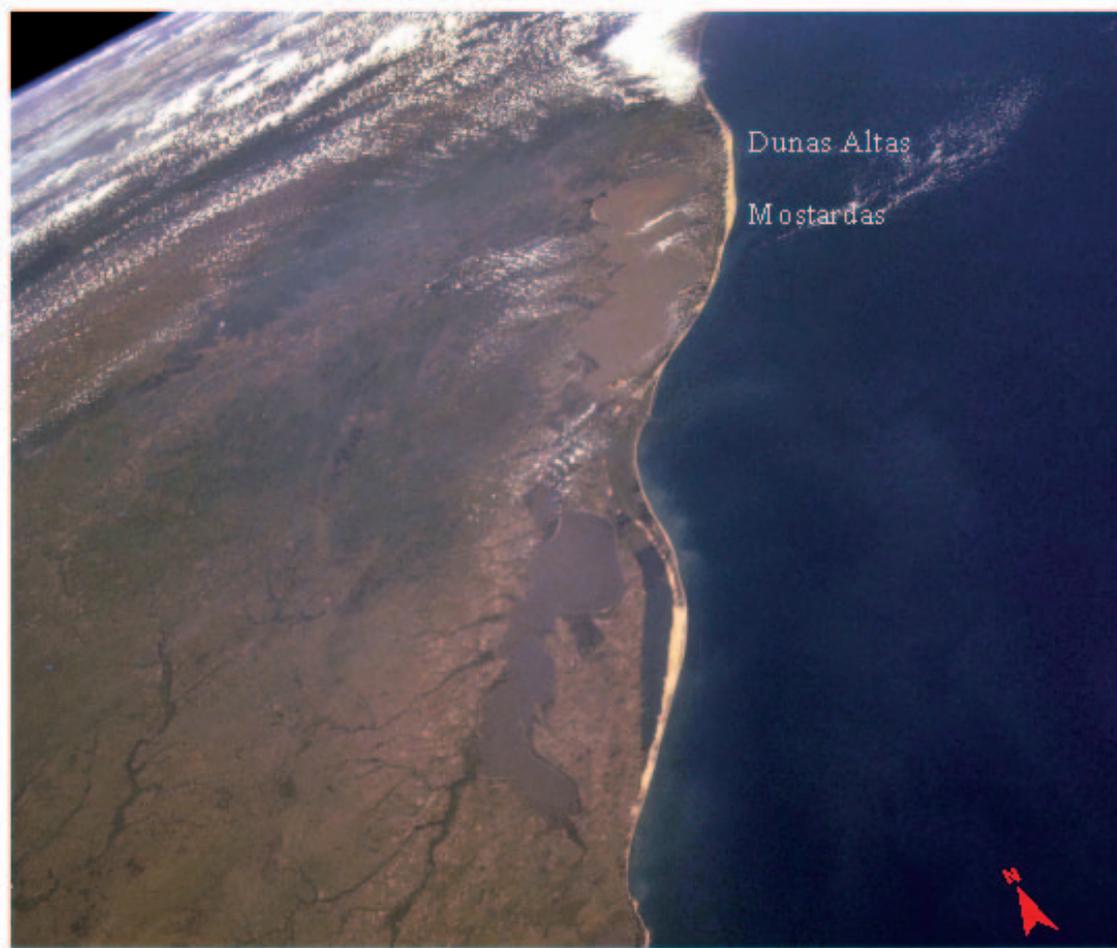
As mudanças na largura da antepraia e do campo de dunas costeiras ocorrem do mesmo modo ao longo do litoral médio: a região com maior largura da antepraia também está associada com a região onde ocorre a maior largura do campo de dunas. Em ambos, a largura é pronunciada como indicam as suas medidas (Figura 5). A largura média do campo de dunas muda de menos de 1 km para mais de 6 km ao longo das praias de Mostardas e Dunas Altas, respectivamente (Toldo *et al.*, 2006b, 2006c).

Devido ao grande volume de sedimentos transportados pela deriva litorânea, com direção resultante para NE, e ao engarrafamento de parte desse volume junto às inflexões da linha de costa em Mostardas e Dunas Altas, a acumulação dessa areia torna-se uma importante fonte de sedimentos para o desenvolvimento da antepraia bem como do campo de dunas costeiras. Em resposta aos fortes e frequentes ventos de NE, o transporte eólico é muito ativo, o que faz as dunas de areia migrar para o interior da planície costeira, na direção SW (Tomazelli *et al.*, 2000), desenvolvendo extensos campos de dunas, principalmente em Mostardas e Dunas Altas (Figura 6).

## 10. ANTEPRAIA DO LITORAL NORTE

Tanto o setor costeiro quanto a plataforma continental do Rio Grande do Sul, possuem um bom nível de reconhecimento, diferentemente do quase desconhecido setor de antepraia, aqui definido desde a zona de arrebentação até -15/-20 m. Dados de geologia, batimetria e sonografia, detalhados pelo projeto PETROBRAS/UFPR/UFSC/FURG/UFGRS, permitiram determinar os limites de dinâmica e os aspectos evolutivos da antepraia junto aos sistemas praias e de plataforma, numa seção de 80 km, ao longo, e de 30 km, ao largo do litoral norte do estado, até os -50 m de profundidade. As análises estão embasadas em 6 perfis perpendiculares e 8 longitudinais à costa, com 887 km de perfilagem batimétrica de detalhe, 770 km de sonografia, 11 perfis batimétricos de antepraia, além de 284 amostras sedimentares da plataforma continental e de 27 testemunhos, com 23,31 m de seção (Gruber, 2002; Gruber *et al.*, 2003).

As características da antepraia da área de estudo configuram-se pela interação da dinâmica marinha e da morfologia da plataforma continental, num condicionamento dado, tanto pela herança geológica quanto pela morfodinâmica marinha atual, reproduzida na distribuição sedimentar e nas feições de fundo. A aplicação do conceito de perfil de equilíbrio praias (Dean, 1977) revelou, nos ajustes dos perfis, que estes sistemas praias encontram-se em equilíbrio no envelope de sedimentos, apontando para praias dissipativas, com o fator forma “m” ajustado em 0,74, parâmetro “A” entre 0,063 e 0,0714, e Md de 2,67 a 3,34  $\hat{\text{O}}$ . Apesar da pequena extensão do segmento, grandes variabilidades foram identificadas, refletindo as tendências de erosão atribuídas ao litoral norte do estado. Foram caracterizados três setores morfodinâmicos: Norte,



**Figura 6.** Imagem do litoral do estado com destaque para as inflexões da linha de praia em Mostardas e Dunas Altas. A imagem mostra também o alargamento do campo de dunas nessas duas praias (Banco de Imagens da NASA).

Centro e Subsetor transicional Centro-Meridional. Variações transversais à praia mostram três zonas de dinâmica distinta: zonas de alta energia, de transição e de baixa energia, permitindo uma classificação de antepraia superior, intermediária e inferior.

Para a plataforma continental, o geoprocessamento detalhou a morfologia e a cobertura sedimentar num fundo regular e de baixos gradientes, revelando três setores de controle morfo-sedimentar: Norte, Centro e Sul. Perfis transversais estendidos até os -40 m caracterizaram o limite morfológico externo da antepraia, bem definido aos -18 m para o Setor Norte, e dos -16 a -25 m para o Setor Centro e Subsetor

Centro-Meridional, como erosional. Correlação dos mapas texturais, parâmetros estatísticos e sonografia, revelaram oito fácies, com variações subordinadas aos mecanismos de acumulação e retrabalhamento.

A interpretação dos dados geológicos e paleontológicos indica uma translação da barreira por sobre ambientes lagunares. Revela ainda variações sedimentares de ocorrência relíquia e palimpsésica, bem como de aspectos do condicionamento da topografia antecedente da plataforma interna e da evolução de antepraia. Os registros dos perfis ao longo da área mostram contrastes correlacionados à variabilidade de barreiras holocênicas no Rio Grande do Sul.



## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, L.E.S.B.; Rosauero, N.M.L. & Toldo Jr., E.E. 1997. Análise Preliminar das Marés na Barra do Rio Tramandaí, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 12. 1997, Vitória, ES. **Anais...** Vitória, ES, ABRH. v.1, p. 560-566.
- Almeida, L.E.S.B. & Toldo Jr., E.E. 1997. **Relatório Técnico – Projeto Estudos Ambientais em Áreas Costeiras e Oceânicas na Região Sul do País – Região de Osório, RS - Grupo de Física.** Porto Alegre, RS, IPH/UFRGS.
- Almeida, L.E.S.B.; Rosauero, N.L.; Toldo Jr., E.E. & Gruber, N.L.S. 1999. Avaliação da profundidade de fechamento para o litoral norte do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte, MG, ABRH. 1 CD-ROM.
- Alvarez, J.A.; Gré, J.C.R. & Toldo Jr., E.E. 1981. Estudos da Praia a Nordeste do Molhe de Rio Grande. **Pesquisas**, 14:131-147.
- Absalonsen, L. & Toldo Jr., E.E. 2005. Variação da linha de costa para a praia de Mostradas. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO 10. 2005, Guarapari, ES. **Anais...** Guarapari, ES, ABEQUA. 1 CD-ROM.
- Barletta, R.C. 2000. **Efeitos da Iteração oceano-atmosfera sobre a morfodinâmica das praias do litoral central do Rio Grande do Sul, Brasil.** Rio Grande. 160p. Dissertação de Mestrado em Oceanografia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- Barros, C.E.; Toldo Jr., E.E. & Rizzardo, R. 2005. Concentração de Minerais Pesados das Praias do Litoral Norte e Médio do Rio Grande do Sul: Relações entre Deriva Litorânea e Processos Erosivos. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 10., 2005, Guarapari, ES. **Anais...** Guarapari, ES, ABEQUA. 1 CD-ROM.
- Calliari, L.J. & Klein, A.H.F. 1993. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das Praias Oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. **Pesquisas**, 20(1):48-56.
- Calliari, L.J.; Tozzi, H.A.M. & Klein, A.H.F. 1996. Erosão associada a marés meteorológicas na costa sul-riograndense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1996, Salvador, BA. **Anais...** Salvador, BA, SBG. v.4, p. 682-684.
- Calliari, L.J.; Speranski N.S. & Boukareva, I.I. 1998. Stable focus of wave rays as a reason of local erosion at the Southern Brazilian coast. **Journal of Coastal Research**, SI 37:19-23.
- Calliari, L.J.; Toldo Jr., E.E. & Nicolodi, J.L. 2006. Classificação Geomorfológica do Litoral do Rio Grande do Sul. In: Muehe, Dieter & Ministério do Meio Ambiente (Ed.). **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro.** v.1, p. 437-445.
- Coli, A.B. 2000. **Estudo sobre o clima de ondas em Rio Grande, RS.** Rio Grande. 80p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica. Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- Davis Jr., R.A. 1997. Regional Coastal Morphodynamics Along the United States Gulf of Mexico. **Journal of Coastal Research**, 13(3):595-604.
- Dean, R.G. 1977. **Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts.** Newark, Delaware, Department of Civil Engineering, University of Delaware. (Ocean Engineering Report, n.12)
- Detle, H.H. 2001. Influence of shoreline alignment on offshore sediment transport. In: COASTAL DYNAMICS'91., 2001, Lund, Sweden. **Proceedings...** Lunden, ASCE. p. 938-947.

- Dillenburg, S.R.; Esteves, L.S. & Tomazelli, L.J. 2004. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 76(3):611-623.
- Dyer, K.R. & Huntley, D.A. 1999. The origin, classification and modeling of sand banks and ridges. **Continental Shelf Research**, 19:1285-1330.
- Esteves, L.S.; Toldo Jr., E.E.; Dillenburg, S.R. & Tomazelli, L.J. 2002. Long and short-term coastal erosion in southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, 36:273-282. Trabalho apresentado no Proceedings of the 7th International Coastal Symposium, Northern Ireland.
- Gruber, N.L.S. 2002. A antepraia na região de Tramandaí, RS. Porto Alegre. 221 p. Tese de Doutorado em Ciências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gruber, N.L.S.; Toldo Jr., E.E.; Barboza, E.G. & Nicolodi, J.L. 2003. Equilibrium beach and shoreface profile of the Rio Grande do Sul coast - south of Brazil. **Journal of Coastal Research**, 35:253-259. Trabalho apresentado no Proceedings of the Brazilian Symposium on Sandy Beaches: Morphodynamics, Ecology, Uses, Hazards and Management, Itajaí, SC – Brazil.
- Lima, S.F.; Almeida, L.E.S.B. & Toldo Jr., E.E. 2001. Estimate of longshore sediments transport from waves data to the Rio Grande do Sul coast. **Pesquisas**, 28(2):99-107.
- Martins, L.R. 1967. Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. **Publicação Especial. Escola de Geologia, UFRGS**, 13. 100p.
- Martins, L.R.; Urien, C.M. & Martins, I.R. 1973. Sedimentos modernos e relíquias da plataforma continental sul americana oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27. 1973. Aracajú, SE. **Anais...** Aracajú, SE, SBG. v.1, p. 212-213.
- Martins, L.R. & Corrêa, I.C. 1996. **Morphology and Sedimentology of Southwest Atlantic Coastal Zone and Continental Shelf from Cabo Frio (Brazil) to Peninsula Valdes (Argentina)**. Porto Alegre, RS, [s.n.]. (IOC—UNESCO / MCT / CPRM Publication, n.20, maps and glossary). 74p.
- Martins, R.R.; Toldo Jr., E.E. & Almeida, L.E.S.B. 1998. Trenó para Medidas do Fundo da Zona de Surfe. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 3: 105-110.
- Nicolodi, J.L.; Toldo Jr., E.E. & Gruber, N.L.S. 2000. Análise da Direcionalidade das Correntes Litorâneas no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. **A Oceano**, 1:461-463. Trabalho apresentado na 13ª Semana Nacional de Oceanografia, 2000, Itajaí, SC.
- Nicolodi, J.L.; Siegle, E.; Rechden Fo., R. & Corrêa, I.C.S. 2002. Análise sedimentológica do pós-praia no Rio Grande do Sul. In: Martins, L.R.; Toldo Jr.; E.E. & Dillenburg, S.R. (Ed). **Erosão Costeira: Causas, análise de risco e sua relação com a gênese de depósitos minerais**. Porto Alegre, RS, CECO-IG-UFRGS. 3p.
- Nicolodi, J.L.; Toldo Jr., E.E. & Almeida, L.E.S.B. 2003. Correntes Costeiras Induzidas por Eventos de Tempestades no Litoral Médio do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9. 2003. Recife, PE. **Anais...** Recife, PE, ABEQUA. 1 CD-ROM.
- Nicolodi, J.L. 2006. O Padrão de Ondas no Lago Guaíba e sua Influência nos Processos de Sedimentação. 2007. 178p. Tese de Doutorado em Ciências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pajak, M.J. & Leatherman, S. 2002. The high water line as shoreline indicator. **Journal of Coastal Research**, 18(2):329-337.



- Siegle, E. 1996. **Distribuição sedimentar ao longo do Litoral Sul Rio Grandense (Trecho Farol da Conceição – Arroio Chuí) e fatores condicionantes**. Rio Grande. 91p. Trabalho de Graduação do Curso de Oceanografia. Fundação Universidade Rio Grande.
- Toldo Jr., E.E.; Dillenburg, S.R.; Cunha, L.O.B.P.; Almeida, L.E.S.B.; Tabajara, J.L. & Martins, R.R. 1993. Parâmetros Morfodinâmicos da Praia de Imbé, RS. **Pesquisas**, **19**(1):27-32.
- Toldo Jr., E.E.; Almeida, L.E.S.B.; Turcato, M. & Gruber, N.L.S. 1999a. Migração dos Bancos da Zona de Surfe do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 7., 1999. Recife, PE. **Anais...** Recife, PE, ABEQUA. 1 CD-ROM.
- Toldo Jr., E.E.; Almeida, L.E.S.; Barros, C. & Martins, L.R. 1999b. Retreat of the Rio Grande do Sul coastal zone, Brazil. In: Martins, L.R. & Santana, C.I. (Ed.). **Non Living Resources of the Southern Brazilian Coastal Zone and Continental Margin**. Porto Alegre, RS, CECO-IG-UFRGS. p. 62-68.
- Toldo Jr., E.E.; Dillenburg, S.R.; Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, **16**(3):816-822.
- Toldo Jr., E.E. & Almeida, L.E.S.B. 2003a. A linha d'água como indicadora da posição da linha de praia. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9. 2003, Recife, PE. **Anais...** Recife, PE, ABEQUA 1 CD-ROM.
- Toldo Jr., E.E.; Almeida, L.E.S.B.; Esteves, L.S. & Nicolodi, J.L. 2003b. Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL ENGINEERING AND SCIENCE OF COASTAL SEDIMENT PROCESS, 5., 2003, Clearwater Beach, Florida, **Proceedings...** Clearwater Beach, Florida, ASCE. 1 CD-ROM.
- Toldo Jr., E.E., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S., Ferreira, E.R. & Gruber, N.L.S. 2006a. Wave prediction along Lagoa do Patos coastline, southern Brazil. **Atlântica**, **28**(2):87-95.
- Toldo Jr., E.E.; Nicolodi, J.L.; Almeida, L.E.S.B.; Corrêa, I.C.S. & Esteves, L.S. 2006b. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. **Journal of Coastal Research**, **SI39**:390-394.
- Toldo Jr., E.E., Almeida, L.E.S.B., Nicolodi, J.L., Absalonsen, L. & Gruber, N.L.S. 2006c. O Controle da Deriva Litorânea no Desenvolvimento do Campo de Dunas e da Antepraia no Litoral Médio do Rio Grande do Sul. **Pesquisas**, **33**(2):35-42.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 1992. Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas**, **19**:3-12.
- Tomazelli, L.J.; Villwock, J.A.; Dillenburg, S.R.; Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1996. Erosão Costeira no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1996, Salvador, BA. **Anais...** Salvador, BA, SBG. v. 4, p. 685-687.
- Tomazelli, L.J.; Dillenburg, S.R. & Villwock, J.A. 2000. Late quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, Southern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, **30**(3):474-476.
- Tozzi, H.A.M. 1999. **Influência das tempestades extratropicais sobre o estoque subaéreo das praias entre Rio Grande e Chuí, RS: Campanha do outono e inverno de 1996**. Porto Alegre. 115p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center / CERC. 1984. **Shore Protection Manual**. 4. ed. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. USA. v.1, 208p.

Wainer, I.J. 1963. **Análise e Previsão das Alturas de Onda em Tramandaí**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Relatório Técnico.



