

CORRENTES COSTEIRAS INDUZIDAS POR EVENTOS DE TEMPESTADES NO LITORAL MÉDIO DO RIO GRANDE DO SUL.

João Luiz Nicolodi¹, Elírio E. Toldo Jr.², Luiz E. S. B. Almeida³

¹Msc. em Geociências.. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – CECO. Instituto de Geociências (IG) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (UFRGS) Av. Bento Gonçalves 9500. Campus do Vale. Agronomia. Porto Alegre, RS. Prédio 43125. Telefone: (51) 3316-6373, (51) 3316-6388 e (51) 91296982. Email: jl.nicolodi@bol.com.br

² Dr. em Geociências.. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – CECO. Instituto de Geociências (IG) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (UFRGS). Email: toldo@vortex.ufrgs.br

³ Prof. Dr. no Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH – UFRGS. Email: luz.almeida@ufrgs.br

Resumo: O presente trabalho visa analisar a presença de correntes costeiras induzidas por eventos de tempestades na costa gaúcha. Neste caso foram avaliadas quatro datas distintas do satélite Landsat na região de Mostardas, litoral médio do RS, onde observou-se a presença de uma circulação episódica restrita sobre a antepraia, caracterizada por um forte jato costeiro. Foram analisados dados meteorológicos, cartas sinóticas e imagens do satélite GOES, para as datas em questão, sendo que percebe-se uma correlação entre eventos meteorológicos de grande magnitude e a ação de tal corrente. Os sedimentos que entram na zona de surfe e antepraia são provenientes da erosão da linha de praia. Inicialmente estes sedimentos são transportados para zonas próximas a costa, onde permanecem estacionados em uma determinada profundidade. Eventos meteorológicos de grande magnitude ressuspendem e transportam os sedimentos, sendo que uma fração desta carga sedimentar é incorporada aos extensos bancos arenosos que se desenvolvem sobre a antepraia, fazendo progredir a linha de costa.

Abstract: This paper analyze the presence of coastal currents induced by storm events in the Rio Grande do Sul coast, Brazil. The coastline oriented NE-SW is subject to dominant swell waves generated in the South Atlantic. The combination of meteorological data, Landsat and GOES satellite images from four different times along of Mostardas beach was analyzed and reveal the presence of short - term coastal currents circulation overtopping the shoreface, during the passage of cold fronts from the south and southeast, when the coast typically experiences high wave energy conditions. This current was named as alongshelf jet. As a result, these current rework the sediments from extensive shoreline erosion along this coast and redistribute in the shoreface, during aperiodic storm events.

Palavras-Chave: Transporte de sedimentos, correntes costeiras, largura da antepraia.

1. Introdução

Bancos arenosos são feições significantes em muitas regiões costeiras onde o estoque de areia é abundante e as correntes são fortes o suficiente para remobilizar os sedimentos. Duas podem ser a fonte destes sedimentos: o próprio sistema da antepraia ou a erosão costeira, sendo que o transporte dos mesmos se dá tanto como carga de fundo ou em suspensão (Dyer & Huntley 1999).

Na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul (RS) os depósitos arenosos são abundantes (Martins *et al.* 1972). As correntes longitudinais apresentam-se excepcionalmente intensas quando submetidas a tempestades associadas à passagem de frentes frias que frequentemente atingem a costa nos meses de outono e inverno. Estes eventos geralmente acumulam água na costa resultando em marés meteorológicas de aproximadamente 1,5 m de altura, que combinadas à alta energia das ondas, são responsáveis por intensos processos de erosão costeira e transporte de sedimentos.

Este artigo analisa a presença de uma circulação episódica restrita sobre a antepraia na região de Mostardas, no Litoral Médio do RS (Fig.1), caracterizada por um forte jato costeiro que está associado a eventos meteorológicos de grande magnitude. São analisadas imagens de satélite de quatro datas distintas obtidas tanto em períodos em que as condições atmosféricas e do mar são consideradas normais quanto em períodos em que a região estava submetida a passagem de uma intensa frente fria associada a um sistema de baixa pressão localizado no Atlântico Sul

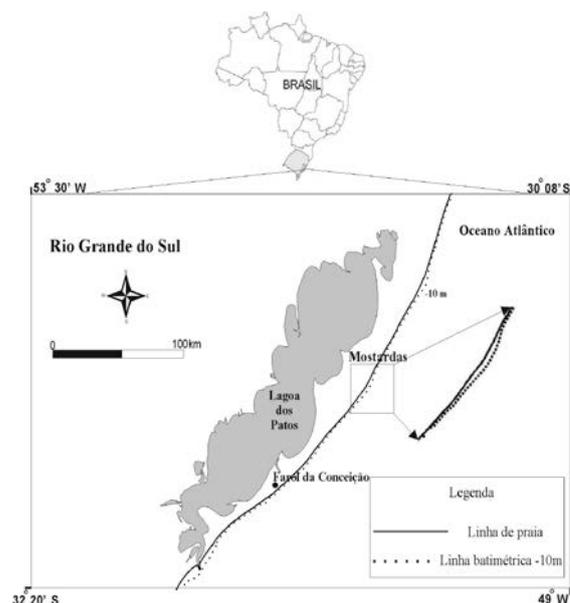


Figura 1. Localização da área de estudo.

1.2 Área de estudo

A costa gaúcha é representada por cerca de 630 km de praias expostas caracterizadas por depósitos quaternários inconsolidados, constituindo-se numa barreira arenosa complexa, composta por quatro sistemas deposicionais laguna - barreira formados pelas flutuações do nível do mar durante o Quaternário (Villwock & Tomazelli, 1995). Atualmente este ambiente não recebe

suprimentos de sedimentos continentais, pois a descarga de areia produzida pela bacia de drenagem de sudeste do estado é retida nos sistemas lagunares e estuários, como por exemplo na Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim que ocupam aproximadamente 13.750 km², quase um terço da área da Planície Costeira do estado (Tomazelli & Villwock 1992, Toldo *et. al* 2000, Toldo & Dillenburg 2002).

A plataforma continental estende-se por até 200 km, sendo que o valor médio da profundidade da linha de quebra é aproximadamente 120 m e sua declividade é suave, variando entre 0.03° e 0.08° (Correa *et al.* 1996).

Os sedimentos ao longo da praia e da zona de surfe são formadas por areias quartzosas, finas e bem selecionadas (tamanho médio 0.2 mm), exceto ao longo de 60 km conhecido como Concheiros do Albardão, localizado ao sul da desembocadura da Lagoa dos Patos e que apresenta sedimentos bimodais compostos por areias finas quartzosas e cascalho biodetrítico (Nicolodi *et al.* 2002, Gruber 2002, Weshenfelder *et al.* 1997, Siegle 1996, Calliari & Klein 1993).

Toda a atual formação da Planície Costeira do RS está associada à dinâmica costeira vigente na região, sendo ela a principal responsável pelo desenvolvimento das praias arenosas e pelos processos erosivos e deposicionais que as mantém em constante alteração.

A orientação da linha de costa é no sentido NE – SW, sendo que a mesma está submetida a um regime de ondas de swell que são geradas no Atlântico Sul e a ondas locais geradas por ventos de nordeste. Exceto pela passagem de frentes frias provenientes do sul e sudeste a costa do RS é dominada por ondas de média a alta energia com altura significativa média de 1.50 m e período médio entre 7 e 9 segundos.

A variação da maré astronômica tem amplitude média de 0.45 m e consequentemente o transporte e deposição de sedimentos ao longo da costa é condicionado principalmente pela ação das ondas (Almeida *et al.* 1999).

2. Transporte Longitudinal de Sedimentos

A deriva litorânea, resultante dos processos referentes ao clima de ondas e correntes associados a geomorfologia local, tem sua direção resultante de SW – NE, como pode ser evidenciado pelas feições geomorfológicas ao longo da costa gaúcha (Tomazelli & Villwock, 1995).

Lima *et al.* 2001, estimaram matematicamente o transporte longitudinal de sedimentos na costa gaúcha através do método do fluxo de energia (U.S. Army, 1984) e obtiveram boa concordância dos resultados quando comparados as evidências geomorfológicas de deriva litorânea.

O litoral do RS foi dividido em oito trechos baseado em diferenças no alinhamento da linha de praia (Fig 2). Esse modelo prevê substanciais variações no fluxo de energia na zona de surfe devido a pequenas modifica-

ções no alinhamento da linha de praia e consequentemente no transporte potencial ao longo da costa.

Verificou-se que as ondas provenientes do quadrante sul equivalem a 9% do conjunto de dados e são responsáveis por mais de 30% do transporte longitudinal total, enquanto que as ondas de N-NE representam 13% das ondas incidentes e produzem menos de 2% da deriva total.

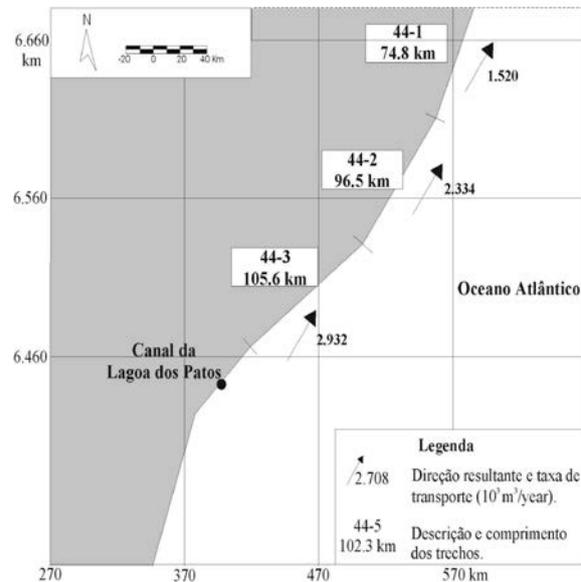


Figura 2 – Esquema com as taxas de transporte longitudinal nos trechos determinados por Lima *et al.* 2001.

Toldo *et al.* (1999), Nicolodi & Toldo (1999) e Esteves *et al.* (2001) realizaram levantamentos da posição da linha de praia na costa gaúcha com a utilização de DGPS nos anos entre 1997 e 2000 que foram comparados a levantamentos pré existentes realizados por retificação de fotografias aéreas do ano de 1975 obtidas pela Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro. Estes resultados apresentam boa concordância com as taxas de deriva litorânea, ou seja, os trechos com maior taxa de transporte correspondem aos trechos com maiores taxas de erosão.

A área de estudo do presente trabalho encontra-se em uma zona limite entre os trechos 44-3 e 44-2 por apresentar, neste local, uma nítida variação no alinhamento da linha de praia. O trecho 44-3 possui 105 km de extensão e tem o transporte longitudinal estimado em 2.9 milhões m³/ano. O trecho adjacente (44-2) tem 96 km de extensão e transporte estimado em 2.3 milhões m³/ano.

3. Variações na largura da antepraia

A antepraia apresenta extensas barras arenosas com declividade média de 1:100 e seus limites externos encontram-se entre as profundidades de 10 e 15 m. Analisando os limites da antepraia na costa gaúcha, Gruber & Nicolodi (1998) classificaram o fundo oceânico da Plataforma Interna como bastante regular, de baixos gradientes, relativamente homogêneo e com textura arenosa granular fina passando à sedimentos finos (siltes) com o incremento de profundidade.

A largura média da antepraia varia de aproximadamente 1 km nos trechos 44-3, 44-2 e 44-1 a mais de 3 km na porção sul dos trechos 44-2 e 44-1, sendo que foi utilizada como limite externo a isóbata de 10 m obtida junto ao mapeamento batimétrico elaborado pela Marinha Brasileira no ano de 1963.

As áreas onde os processos erosivos na linha de costa são mais evidentes (44-3 e 44-2) correspondem aos trechos onde há um acréscimo no fluxo de energia longitudinal e onde o alinhamento da linha de praia é mais exposto ao ataque de ondas de sul. Tal fato torna-se relevante a medida que a resultante do fluxo de energia na zona de surfe decai para o norte, passando de 2.9 milhões m³/ano no trecho 44-3 para 1.5 m³/ano no trecho 44-1 (Fig 2).

Esse contexto indica haver uma ligação entre o balanço do transporte longitudinal envolvendo os trechos 44-3, 44-2, e 44,1 e as variações espaciais na largura da antepraia ao sul dos trechos 44-2 e 44-1 (Toldo *et al.* 2003).

Detle (2001), estudando os processos morfológicos ao longo de 40 km de costa no Mar Báltico considera que uma redução no fluxo no transporte longitudinal devido a variações no alinhamento da linha de praia implica em um engarrafamento de parte dos sedimentos que chega da corrente a montante, sendo que parte deste sedimento é redirecionado da zona de surfe para a antepraia.

4. Sensoriamento remoto e dados meteorológicos

A presença de uma circulação episódica sobre a antepraia foi diagnosticada através da análise de imagens do satélite Landsat 5. Foram analisadas quatro datas distintas (09/03/1993, 10/07/1997, 24/02/2000 e 20/05/2000), sendo que na última percebe-se uma forte corrente costeira transportando sedimentos para a antepraia, fato que não se repete nas demais datas (Fig 3).

Em todas as datas trabalhou-se com a banda 2 (0,520 – 0,600 mm do espectro eletromagnético), a qual apresenta grande sensibilidade a presença de sedimentos em suspensão. As imagens foram tratadas no Software ENVI 3.5 através de rotinas de análise de espectro e alterações de níveis, as quais possibilitam corrigir pequenas distorções provenientes da calibração do satélite e melhorar a visualização do fenômeno.

A relação entre a circulação episódica relatada neste trabalho e eventos meteorológicos é significativa. Foram analisados dados meteorológicos e cartas sinóticas obtidos junto ao Serviço Meteorológico Marinho do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil e imagens do satélite GOES, obtidas junto ao INPE, para as datas em estudo. Os dados indicam a presença de um forte sistema de baixa pressão na área oceânica leste adjacente ao Uruguai no dia 20/05/00, que gerou fortes ventos de S e SE e ondulação de mesma direção com alturas entre 2 e 3 m (tabela 1).

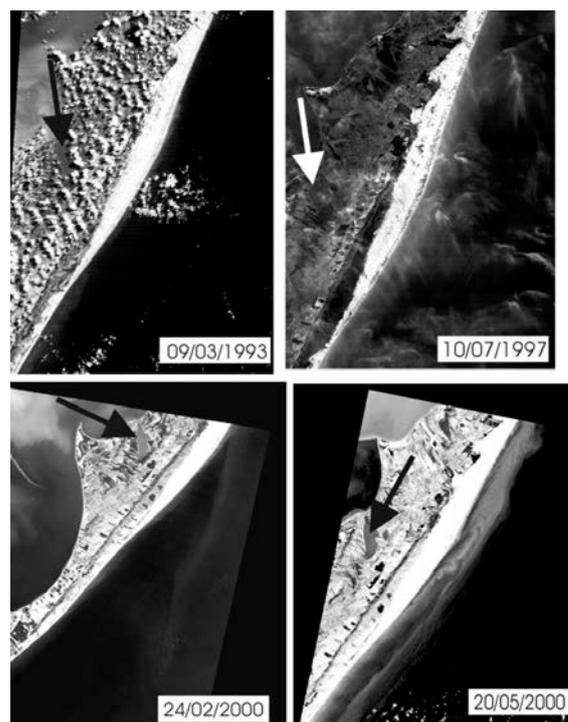


Figura 3. Imagens analisadas em quatro datas diferentes. Na imagem de 20/05/2000 percebe-se a presença de uma circulação episódica restrita sobre a antepraia, na localidade de Mostardas. A seta indica a localização de uma lagoa tomada como referência.

Tabela 1. Dados referentes a altura - direção de ondas e velocidade e direção dos ventos atuantes na região de estudo.

Data	Ondas		Vento	
	H (m) - direção		V(nós) - direção	
09/03/93	1 / 1,5	-	10/15	SW/S
10/07/97	1 / 1,5	-	11/16	N/NE
24/02/00	1 / 1,5	S/SE	11/16	SW/SE
20/05/00	2 / 3	S/SE	22/27	S/SE

Em 20/05/00, a variação de pressão observada nas cartas sinóticas foi de 26 milibares entre o centro de alta pressão e o centro de baixa (Fig. 4). Nesta período o Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil emitiu três avisos para as embarcações que localizavam-se ao sul do paralelo 30°S. O primeiro, em 19/05, alertava para a presença de ventos fortes a muito fortes do quadrante S. O segundo era um aviso de “mar muito grosso” com alturas de onda entre 3 e 5 m e foi emitido em 20/05. O terceiro, também de 20/05, indicava a presença de uma forte ressaca no litoral gaúcho com ondulação entre 2 e 3 m.

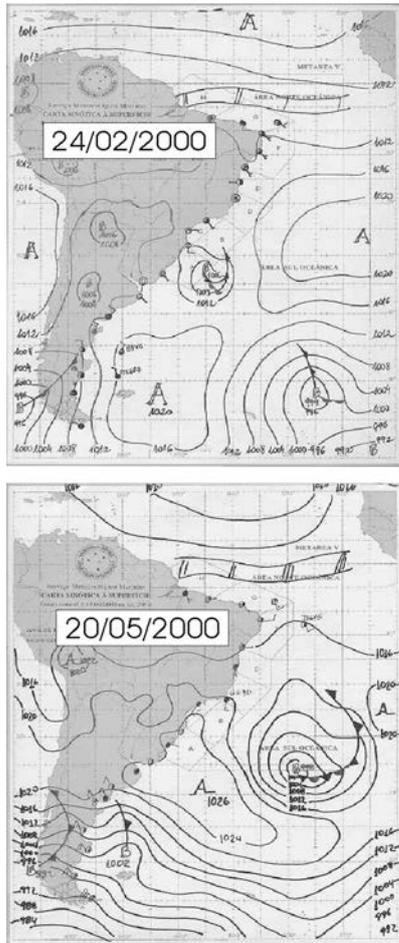


Figura 4. Cartas sinópticas da área de estudo em duas datas distintas. Na imagem de 20/05/2000 percebe-se a atuação de um forte ciclone na área sul oceânica, o que não se repete na imagem de 24/02/2000.

Já para as outras datas, as condições eram consideradas normais, com ventos moderados e ondulação com altura entre 1 e 1,5 m. As imagens do satélite GOES também não registram a presença de nenhum tipo de ciclone extra-tropical associados a sistemas de baixa pressão na região para esta data.

A influência do poder erosivo que os sistemas meteorológicos de alta energia imprimem nas praias do RS foram relatados em trabalhos de Tozzi (1999), Nicolodi (1999), Calliari *et al.* (1998), sendo que Barletta & Calliari (2001) observaram variações de volume da ordem de $60\text{m}^3/\text{m}$ de areia erodida em um perfil praiar na região do Farol da Conceição após a passagem de um evento meteorológico de alta intensidade em julho de 1996.

5. Conclusões

Roy & Cowell (1991), discutem os efeitos na mobilidade e retrabalhamento dos sedimentos na antepraia geradas em condições de tempestade através dos mecanismos de retrabalhamento associados a ciclos de erosão de praias, especialmente durante violentas tempestades na costa. Medições de campo executadas por

Wright *et al.*, (1991) indicam que os fluxos de sedimentos são de uma magnitude bem maior durante as tempestades do que durante os períodos dominados pela ação das ondas consideradas normais.

A circulação episódica restrita sobre a antepraia da região de Mostardas foi analisada por Toldo *et al.* (2003), sendo proposto um modelo conceitual no qual os sedimentos que entram na zona de surfe e antepraia são provenientes da erosão da linha de praia. Inicialmente estes sedimentos são transportados para zonas próximas a costa, onde permanecem estacionados em uma determinada profundidade. Eventos meteorológicos de grande magnitude, como o observado em 20/05/2000 ressuspendem e transportam os sedimentos, sendo que uma fração desta carga sedimentar é incorporada aos extensos bancos arenosos que se desenvolvem sobre a antepraia, fazendo progredir este trecho da linha de costa, como é possível observar no contorno batimétrico da Figura 1

Os resultados obtidos na análise de dados meteorológicos e imagens de satélite, aliado aos resultados obtidos em estudos sobre o transporte longitudinal de sedimentos e sobre erosão costeira avalizam o modelo proposto por Toldo *et al.* (op cit).

A relação entre a circulação episódica restrita sobre a antepraia na região de Mostardas, RS, e a passagem de eventos meteorológicos como frentes frias associadas a sistemas de baixa pressão é evidente. Sugere-se a continuação do trabalho com análises de outras datas que venham a aferir de maneira mais precisa o modelo proposto.

Referencias Bibliográficas

- ALMEIDA, L.E.S.B., ROSAURO, 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. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 1999.
- BARLETTA, R.C., CALLIARI, L.J. (2001). Determinação da intensidade das tempestades que atuam no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Pesquisas. Instituto de Geociências. UFRGS. 28(2): 117-124.
- CALLIARI, L.J.; KLEIN, A.H.F. (1993). Características Morfo-dinâmicas e sedimentológicas das Praias Oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. In: Pesquisas, Porto Alegre, RS, Brasil. V. 20, p. 48-56.
- CALLIARI, L.J., TOZZI, H.A.M., KLEIN, A.H.F. (1998). Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil – Rio Grande to Chuí. In: Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) Meeting. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 70(2): 231-247.
- CORREA, I.C.S.; MARTINS, L.R.S.; KETZER, J.M.M.; ELIAS, A.R.D.; MARTINS, R. (1996). Evolução Sedimentológica e Paleogeográfica da Plataforma Continental Sul e Sudeste do Brasil. In. Notas Técnicas, CECO/IG/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. V.9, p 51-61.
- DETTE, H.H. (2001). Influence of shoreline alignment on offshore sediment transport. Proceedings of Coastal Dynamics'91, ASCE, p 938-947.

- DYER, K.R AND HUNTLEY, D.A. (1999). The origin, classification and modeling of sand banks and ridges. *Continental Shelf Research* 19:1285-1330.
- ESTEVEZ, L. S.; TOLDO E. E. Jr., ALMEIDA L. E. S. B., NICOLODI, J. L. (2001). Variações da linha de costa no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: I Congresso Do Quaternario De Países De Língua Iberica, Lisboa. I Congresso do Quaternario de Países de Língua Iberica - ACTAS. Lisboa: Sociedade Geologica de Portugal, 2001. v. 1, p. 194-198.
- GRUBER, N. L. S., NICOLODI J. L. (1998) Limites Externos da Antepraia com base na morfologia e sedimentologia em Tramandaí - RS. In: II Simpósio Nacional de Geomorfologia, Florianópolis. ANAIS -. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. v. 1.
- GRUBER, N.L.S. (2002). A antepraia na região de Tramandaí, RS. Tese de doutorado. Curso de Pós-graduação em Geociências. UFRGS. 221p.
- LIMA, S.F., ALMEIDA, L.E.S.B., TOLDO, E.E. Jr. (2002). Estimativa da capacidade do transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. *Revista Pesquisas. Instituto de Geociências. UFRGS.* 28(2): 99-107.
- MARTINS, L.R.S.; MELO, U.; FRANÇA, A.M.C.; SANTANA, I., MARTINS, I. (1972). Distribuição faciológica da margem continental sul-riograndense. XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém, 115-132.
- NICOLODI, J. L.; TOLDO E. E. Jr. (1999) A Erosão Costeira no Rio Grande do Sul. In: XI Salão De Iniciação Científica, Porto Alegre. CD ROOM. Porto Alegre: UFRGS.
- NICOLODI, J. L. (1999). Os Impactos produzidos pelas ressacas no Balneario de Cidreira, litoral Norte do Rio Grande do Sul. Curso de Graduação em Geografia. UFRGS. Trabalho de Graduação. 94 p.
- NICOLODI, J.L., SIEGLE, E., REDCHEN F., R., CORREA, I.C.S. (2002). Análise sedimentológica do pós praia no Rio Grande do Sul. Relatório do CECO-IG-UFRGS. In: Martins L.R., Toldo, E.E. Jr., Dillenburg, S.R. (eds). Projeto Erosão Costeira: causas, análise de risco e sua gênese de depósitos minerais. Porto Alegre. 3p.
- ROY, S.P., COWELL, P. (1991). Geological Inheritance Effects in the Response of the Shoreface to Coastal Storms. *Coastal Development: Policy and Management.* Dragovich.D. Ed.Sydney 74-82p.
- SIEGLE, E. (1996). Distribuição dos Sedimentos Litorâneos entre o Farol da Conceição e o Farol do Chuí, RS, e Fatores Condicionantes. Curso de Graduação em Oceanologia, Fundação Universidade Rio Grande. Trabalho de Graduação. 91 p.
- TOLDO, E. E. Jr., ALMEIDA, L.E.S., BARROS, C., AND MARTINS, L.R. NICOLODI, J.L. (1999) Retreat of the Rio Grande do Sul coastal zone, Brazil. In: Martins, L.R. and Santana, C.I. (eds.). *Non Living Resources of the Southern Brazilian Coastal Zone and Continental Margin.* Porto Alegre, Brazil: Editora da UFRGS, pp.62-68.
- TOLDO, E. E. Jr., DILLENBURG, S. R., CORREA, 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, E. E. Jr., and DILLENBURG, S. R. (2002). Swash bar migration at the inlet of the Lagoa dos Patos Lagoon, Brazil. *Journal of Coastal Research.* West Palm Beach, FL, USA. ICS. p 489-492.
- TOLDO JR., E. E., ALMEIDA, L. E. S. B., ESTEVES, L. S., NICOLODI, J.L. (2003). Shoreface width as a function of longshore transport. *Proceedings of the 5th International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Process.* New York, NY: American Society of Civil Engineers, v.1, CD.
- 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. *Pesquisas*, 19(1):3-12.
- 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. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. Tese de Mestrado. 115 p.
- U.S. ARMY. (1984) *Shore Protection Manual.* U.S. Army Engineer Experiment Station. Vicksburg. 4 ed. MS, 2v.
- VILLWOCK, J.A., TOMAZELLI, L.J. (1995). Geologia costeira do Rio Grande do Sul. In: *Notas Técnicas. CECO\IG\UFRGS*, Porto Alegre, RS, Brasil. V.8. 45p.
- WESCENFELDER, J.; ZOUAIN, R.N.A.; ZOMER, S.L.C.; SOUTO, R.P. (1997). Caracterização Morfológica das Praias Oceânicas entre Imbé e Arroio do Sal, RS. In: *Notas Técnicas. CECO\IG\UFRGS.* Porto Alegre, RS, Brasil. V. 7, p 35 – 49.
- WRIGHT, L.D.; BOON, J.D. ; KIM, S.C., LIST, J.H. (1991). Modes Of Cross-Shore Sediment Transport on the Shoreface of the Middle /Atlantic Bight. *Marine Geology*, 96, 19-51.