

## O papel da antepraia na resposta costeira durante a elevação do nível do mar na Barreira Regressiva de Torres a Imbé, RS

Yana Friedrich GERMANI<sup>1</sup>, Salette Amaral de FIGUEIREDO<sup>2</sup> & Lauro Júlio CALLIARI<sup>3</sup> & Humberto Dias VIANNA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande. Av. Itália, km 8, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil (yanafg@hotmail.com, hvianna@furg.br).

<sup>2</sup> Programa de Pós-graduação em Oceanologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande. Av. Itália, km 8, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil (saletteoc@gmail.com.)

<sup>3</sup> Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande. Av. Itália, km 8, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil (lcalliari@log.furg.br).

**Resumo.** A zona costeira é um sistema muito dinâmico, o qual busca atingir um estado de equilíbrio dinâmico. Nos últimos 5,5 ka, o nível médio do mar (NMM) apresentou comportamento praticamente estável, porém, devido às mudanças climáticas está em elevação. Objetivando analisar a influência das variações na morfologia do substrato entre setores costeiros adjacentes (Torres-Capão-Imbé), na resposta à elevação do NMM em médio e longo prazo, foram projetadas linhas de costa futuras para estes cenários. Além da morfologia, investigou-se a existência de diferenças significativas nessas projeções em função das variações na batimetria da antepraia e do balanço sedimentar. Para isso, foi utilizado o modelo RanSTM (*Random Shoreface Translation Model*). Os três setores apresentaram taxas de recuo (transgressão) da linha de costa diferenciadas, influenciadas, primeiramente, pelas variações batimétricas, seguidas do balanço sedimentar. A influência da topografia no recuo foi irrelevante. O setor "Capão", com maior declividade na antepraia, apresentou menores valores de recuo, enquanto o setor "Imbé", com menor declividade na antepraia, apresentou maiores valores de recuo. Ainda, ao padronizar-se o comprimento do perfil no setor "Imbé", obteve-se cerca de 30% de diminuição nos valores de recuo da linha de costa. Os resultados obtidos demonstram a forte influência das variações na morfologia do perfil batimétrico em situação de elevação do NMM, as quais podem ter implicações relevantes no manejo e adaptação locais de regiões costeiras em condição de mudanças climáticas.

**Palavras-chave.** Mudanças climáticas, recuo da linha de costa, RanSTM.

**Abstract.** THE ROLE OF THE SHOREFACE IN THE COASTAL RESPONSE DURING SEA LEVEL RISE IN REGRESSIVE BARRIER FROM TORRES TO IMBÉ, RS. The coastal zone is a very dynamic system which seeks to reach a state of dynamical equilibrium. In the last 5,5 ka, the mean sea level (MSL) presented a quasi-stable behavior, however due to climate change is on the rise. In order to analyze the influence of variations in substrate morphology between adjacent coastal sectors (Torres-Capão-Imbé), in the response to MSL in the medium and long term, future shorelines were projected for these scenarios. In addition to morphology, we investigated the existence of significant differences in these projections due to variations in shoreface bathymetry and sediment budget. The RanSTM (Shoreface Translation Model) model was used for that purpose. The three sectors presented different shoreline recession rates, primarily influenced by bathymetric changes, followed by sediment budget alterations. The influence of topography on recession was irrelevant. The sector "Capão", with the steeper shoreface slope, presented smallest recession values, whereas the sector "Imbé", with the lowest slope in the shoreface, presented highest recession values. By standardizing the profile length of the "Imbé" sector, a decrease of around 30% in the recession values was obtained. The results show that variations in bathymetric profile morphology strongly influence coastal response under rising MSL, which may have relevant implications for local management and adaptation of coastal regions under climate change.

**Keywords.** Climate changes, shoreline recession, RanSTM.

## 1 Introdução

Barreiras costeiras ao redor de todo o mundo tiveram suas evoluções intimamente relacionadas às oscilações do nível médio do mar (NMM) (Dillenburg *et al.*, 2006), cada uma respondendo de maneira peculiar à dinâmica local. Tais oscilações, associadas com os ciclos glacio-eustáticos têm sido responsáveis pelas alterações na configuração da linha de costa, incluindo a progradação e retrogradação costeiras, em condições de regressão, estabilidade e transgressão do NMM (Roy *et al.*, 1994), havendo, segundo Zhang *et al.* (2004), uma forte associação entre a erosão em longo prazo das praias arenosas e essa elevação.

No entanto, além das taxas de mudança do NMM, a tipologia das barreiras, bem como sua evolução em uma costa dominada por ondas, a exemplo do Rio Grande do Sul (RS), é vista como uma resposta complexa às mudanças: na declividade da plataforma interna; no balanço sedimentar vs. espaço de acomodação; na energia das ondas vs. amplitude das marés (Roy *et al.*, 1994; Dillenburg *et al.*, 2000). Nesse contexto, e considerando que o regime de marés influencia muito pouco a costa do RS, quando comparado à incidência de ondas; que não houve um cenário neotectônico para formar um expressivo espaço de acomodação; e que o NMM manteve-se quase estável nos últimos 5 ka, bem como o regime de ondas (Dillenburg *et al.*, 2000; Martinho *et al.*, 2009), entende-se que a tipologia evolutiva das barreiras no RS ocorreu em função das variações da declividade do substrato e da relação com o aporte sedimentar, e que características geológicas herdadas regionalmente, como a declividade, influenciou a resposta costeira em condição de estabilidade do NMM (Roy *et al.*, 1994; Dillenburg *et al.*, 2000).

Porém, o aumento da emissão dos gases do efeito estufa tem causado alterações significativas no clima global, e uma das consequências mais notórias é o aquecimento do planeta. Por conseguinte, o NMM está aumentando (IPCC, 2001, 2007; Church *et al.*, 2013; Nicholls *et al.*, 2014), inicialmente como resultado da expansão térmica, e atualmente em função do derretimento das geleiras e calotas

polares. No futuro, portanto, os impactos das mudanças climáticas na zona costeira podem ser esperados não só devido a mudanças no NMM, como também ao clima de ondas e balanço sedimentar.

No entanto, embora se saiba que o nível dos oceanos está subindo, seu comportamento não é homogêneo ao redor do globo. Conforme observado por Church *et al.* (2013), posteriormente Jackson & Jevrejeva (2016) e Jevrejeva *et al.* (2016) também descreveram um forte padrão regional de mudança no NMM para o século XXI e além, com algumas regiões experimentando desvios significativos da mudança do nível local e regional em relação à mudança global média.

Nesse sentido, sabendo-se que o manejo costeiro requer um entendimento da evolução da barreira/antepraia em larga escala, a fim de prever o comportamento da linha de costa, a abordagem mais comum utilizada até agora para modelar essa evolução envolve conceitos de transladação da barreira costeira como um todo, para cima e em direção ao continente, em resposta ao aumento do NMM, de acordo com a Regra de Bruun generalizada (Dean & Maurmeyer, 1983; Cowell *et al.*, 2006), onde de acordo com a declividade do substrato podem ocorrer variações no modo de resposta e/ou fornecimento ou perda de sedimentos (Bruun, 1962, 1988; Curray, 1964; Niedoroda *et al.*, 1985).

Desse modo, a fim de projetar as linhas de costa futuras da região que se estende de Torres a Imbé-RS, e com o intuito de ponderar a incerteza associada, foi utilizado o modelo estocástico *Random Shoreface Translation Model* (RanSTM) (Cowell *et al.*, 2006), modelo morfológico-comportamental, que simula a resposta costeira baseado na interação entre morfologia e processos, com a possibilidade de que o material seja transferido para regiões submersas como a antepraia, que acresce. O RanSTM admite a incerteza associada às previsões de mudança de linha de costa em longo prazo, objetivando simular durante uma progressiva mudança do NMM, a transladação vertical e horizontal de corpos arenosos costeiros sobre um substrato pré-existente, o qual sofre retrabalhamento como consequência.

O modelo STM na sua versão determinística

foi aplicado por Dillenburg *et al.* (2000) no litoral do RS, de modo a reproduzir a configuração costeira no máximo da Transgressão Marinha Pós-Glacial (TMP) modelando a evolução da costa durante os últimos 9 ka, usando como substrato a morfologia geral atual da plataforma continental. De acordo com os autores, durante uma transgressão marinha, a taxa de transladação da antepraia é simplesmente uma função da declividade do substrato e da velocidade com que o NMM está subindo, se o regime de ondas e o balanço sedimentar são mantidos aproximadamente constantes.

Para Curry (1964), o processo de migração lateral da linha de costa é justamente o resultado do balanço entre a direção e taxa de mudança do NMM, e da taxa de deposição sedimentar. Torna-se claro, portanto, que mudanças nas taxas de elevação do NMM, não apenas controlam a resposta da antepraia, como também influenciam na intensidade das ondas na praia e antepraia (Pilkey *et al.*, 1993), influenciando o balanço sedimentar. Ademais, Bitencourt & Dillenburg (2020) através de técnicas estatísticas multivariadas concluíram que, a diferenciação geomorfológica em larga escala das barreiras holocênicas do RS entre os tipos progradacional, retrogradacional e agradacional se deu, sobretudo, devido às mudanças nas dimensões e na declividade da antepraia.

Dessa forma, considera-se a antepraia como componente imprescindível na estimativa da resposta de manejo e no controle do comportamento costeiro em larga escala (Cowell *et al.*, 1999, 2003a), visto que a partir da integração de conceitos dessa região costeira em procedimentos de modelagem, é possível avaliar efeitos como aumento do NMM, erosão e acreção costeira e mudanças na linha de costa (Bruun, 1962; Dean, 1991; Cowell *et al.*, 1995, 2003b).

Nesse contexto, a hipótese do presente trabalho é que, assim como no passado, em situação de subida do NMM, é muito provável que no futuro, perante situação semelhante de elevação rápida, cada um dos setores da área de estudo também se comporte de forma diferenciada em função de variações na morfologia do substrato. Este, neste estudo, é

compreendido pelo perfil topográfico, obtido por dados de LIDAR e pelo perfil batimétrico da antepraia até a profundidade de fechamento inferior. Assim, espera-se que mesmo dentro da reentrância costeira progradante, que se estende de Torres à Imbé, irão existir variações na evolução da linha de costa/barreira em longo prazo. Esta ideia poderá corroborar com o que fora constatado em trabalhos pretéritos, de que mudanças sutis na declividade da antepraia/plataforma interna, na ordem de alguns minutos de grau, podem resultar em diferentes taxas de transladação da barreira, podendo alterar e até mesmo inverter as condições de regressão e transgressão, estabelecidas em condições de estabilidade do NMM (5 ka até o presente) (Dillenburg *et al.*, 2000).

## 2 Área, materiais e métodos

### 2.1 Localização da área

A costa do RS possui aproximadamente 625 km de extensão, apresentando orientação NE-SO. A hidrodinâmica da região é dominada pela ação das ondas, que tem altura média significativa entre 1 m e 1,5 m. Embora as ondas vindas do quadrante sul sejam menos frequentes, elas são mais intensas, determinando assim, uma resultante de deriva litorânea líquida de SO para NE (Lima *et al.*, 2001), e a grande disponibilidade de sedimentos faz das barreiras costeiras seu mais importante elemento deposicional (Dillenburg *et al.*, 2005). A costa é classificada como sendo de micromaré, com uma amplitude média de apenas 0,5 m (Dillenburg *et al.*, 2009).

Em longo prazo, a evolução costeira da região se deu ao regime energético das ondas combinado às flutuações do NMM durante o Quaternário, originando um sistema multi-complexo de barreiras. De acordo com Roy *et al.* (1994), para a costa do RS, os principais fatores que controlam os diferentes tipos de barreiras são o declive da plataforma interna, a energia de ondas e o balanço sedimentar, sendo a inclinação da plataforma interna mais suave dentro das concavidades e mais íngreme nas projeções costeiras. A plataforma continental adjacente é larga (100 a 200 km), rasa (100

a 140 m), e a disponibilidade substancial de sedimentos, na maior parte clásticos, sob condições de dominância de ondas produziram uma plataforma continental de baixa declividade (0,03° a 0,08°) (Dillenburg *et al.*, 2017), bem como a antepraia, também extensa e rasa, com limite externo entre as profundidades de 25 e 37 m, constituída por depósitos arenosos (Figueiredo, 2011).

A área em foco na atual pesquisa é a região da barreira costeira arenosa holocênica do estado do RS, mais especificamente o trecho de 90 km de extensão que vai de Torres até Imbé (Fig. 1). Densamente povoada, a região localiza-se em uma das concavidades costeiras do estado, com uma barreira holocênica progradante composta por cordões de dunas em uma planície litorânea que varia de 2 a 5 km de largura (Dillenburg *et al.*, 2000).

A barreira regressiva iniciou a sua progradação em 7 ka, ainda sob uma condição de mar em elevação, em decorrência de um expressivo balanço positivo de sedimentos (Dillenburg *et al.*, 2006). Sua fase de regressão forçada, iniciou em 5-6 ka, e aparentemente perdura até os tempos atuais. A taxa de progradação média desta barreira, entre 7 ka e o presente, foi de 0,67 m/ano. A maior largura da barreira que se estende de Torres a Imbé é encontrada no ponto central da região, no balneário de Curumim, (4,7 km), sendo, portanto, uma concavidade que apresenta diferentes taxas de progradação, maiores no centro e menores nas extremidades (Dillenburg *et al.*, 2005). Essas taxas diferenciadas ocorreram em função de variações no balanço sedimentar e/ou no espaço de acomodação, e conseqüentemente na declividade da topografia antecedente.

Em longo prazo (últimos 5,5 ka), portanto, a barreira progradou de Torres à Imbé e permaneceu estável ao sul de Tramandaí (Dillenburg *et al.*, 2000). No entanto, dados de curto prazo, baseados nas posições de linha de costa obtidas por DGPS de 1997 a 2002 para o litoral norte do RS (Esteves *et al.*, 2004), demonstram que o setor costeiro de Torres a Xangri-lá está progradando, está estável de Xangri-lá e Tramandaí, e está retrogradando a partir de Tramandaí para sul (Fig. 1). Uma análise de mudança de linha de costa

baseada em fotografias aéreas de 1974, 1989 e 2000 também indicou que o setor de Xangri-lá à Tramandaí permanece estável, e prograda para norte, em médio prazo (Esteves *et al.*, 2004). Desse modo, a região costeira de Xangri-lá a Tramandaí parece marcar uma transição entre áreas que crescem em curto e longo prazo (ao norte), e áreas que têm permanecido estáveis em longo prazo e erodindo em médio e curto prazos (ao sul) (Esteves *et al.*, 2004).

## 2.2 Materiais e métodos

### 2.2.1 O modelo

Foi utilizado para a simulação da resposta costeira a elevação do NMM o modelo RanSTM (Cowell *et al.*, 2006), modelo estocástico, o qual permite um intervalo de valores para os parâmetros de entrada, considerando a incerteza associada a cada um deles, empregado como alternativa ao modelo determinístico proposto por Cowell *et al.* (1992). O modelo possui como variáveis de entrada: variações do NMM, geometria do substrato e balanço sedimentar; e como variável de saída: distância de recuo. A geometria é representada por dados topobatimétricos, os quais compõe o substrato de cada setor da barreira regressiva (Torres, Capão, Imbé).

O RanSTM lida com a incerteza dos parâmetros ao simular as mudanças costeiras, representando os constituintes da equação 1 para produzir um grande número de estimativas de recuo, a partir das quais as probabilidades de risco são compiladas. Cada parâmetro de entrada (ex. balanço sedimentar) pode ser inserido no modelo através de um intervalo de valores (mínimo, médio e máximo), levando em conta a incerteza associada para a determinação exata deste parâmetro. O recuo pode ser representado em termos de sua curva de risco, na qual a distância de recuo ou transgressão da linha de costa é a grandeza do impacto (Cowell *et al.*, 2006). Portanto, a curva de risco originada a partir da equação 1 representa a probabilidade de uma determinada distância de recuo ser excedida.

$$R(t) = \bar{R}_v(t) + \bar{R}_{SL}(t) + k(t)S_D \quad (1)$$

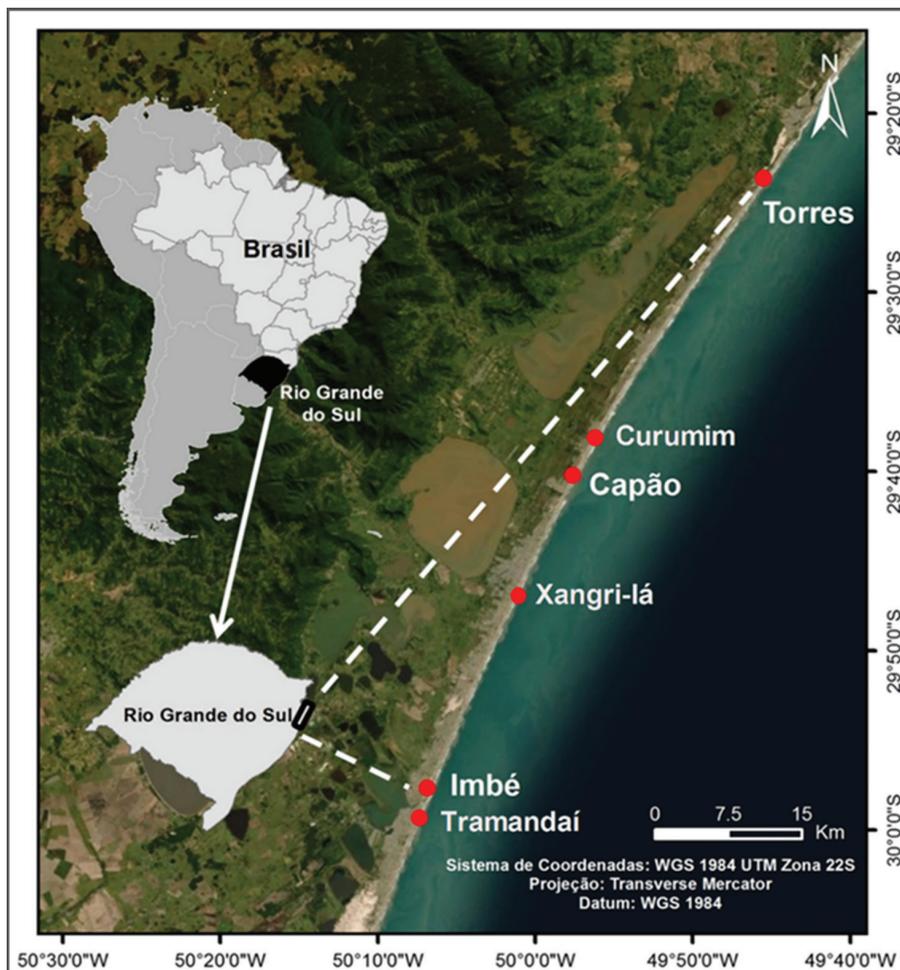


Figura 1. Localização da área de estudo.  
 Figure 1. Location of the study area.

onde,  $R(t)$  é o recuo total,  $\bar{R}_v(t)$  é a tendência média de recuo devido ao balanço sedimentar,  $\bar{R}_{SL}(t)$  é a tendência média de recuo devido à elevação acelerada do nível do mar,  $k(t)S_D$  é o aumento da demanda de erosão devido à tempestades.

O referido modelo foi validado através de modelagem inversa, para a costa Sudeste da Austrália (Cowell *et al.*, 1995, 2001, 2003b; Roy *et al.*, 1994), e por Bose (2019) para a região do Farol da Conceição, no litoral médio do RS. Foram realizadas simulações independentes, nas quais foi possível quantificar individualmente o efeito dos parâmetros batimetria, balanço sedimentar, e geometria do perfil batimétrico (explicado com detalhe na seção 2.2.7) na resposta costeira durante a elevação do NMM. O resultado final foi apresentado na forma de probabilidade de risco, uma forma quantitativa, capaz de demonstrar o risco de erosão sob o qual o setor analisado estará futuramente sujeito, e quais os parâmetros mais relevantes para gerar tal condição (Cowell *et al.*,

2006). Finalmente, os dados de probabilidade de risco simulados para os três setores da área de estudo foram ilustrados em forma de mapas, os quais projetam as linhas de costa futuras para cenários de elevação do NMM nos horizontes temporais de 2040 e 2100.

### 2.2.2 Dados de ondas e profundidades limite da antepraia

Para caracterizar o clima de ondas da área de estudo foram utilizados dados (2006-2016), disponíveis em <https://redeondas.furg.br/index.php/pt/dados/tramandai>.

Como uma primeira aproximação das profundidades de fechamento da antepraia superior ( $h_u$ ) (Eq. 2) e inferior ( $h_l$ ) (Eq. 3) foram utilizadas as equações de Hallermeier (Hallermeier, 1981). As profundidades de fechamento calculadas foram utilizadas como um dos parâmetros de entrada no modelo RanSTM, posteriormente utilizado.

$$h_c \approx 2\bar{H}_{sig} + 11\sigma \quad (2)$$

$$h_i = (\bar{H}_{sig} - 0.3\sigma) \bar{T}_{sig} (g/5000D)^{1/2} \quad (3)$$

onde,  $\bar{H}_{sig}$  é a média anual da altura significativa de onda,  $\bar{T}_{sig}$  é a média anual do período significativo de onda,  $\sigma$  é o desvio padrão da média anual da altura significativa de onda,  $g$  é aceleração devido à gravidade,  $D$  é o diâmetro médio (D50) determinado a partir de uma amostra de areia na profundidade tal que  $h \approx 1.5h_c$ , a qual é aproximadamente 12 m para o clima de ondas da área de estudo.

Para Cowell *et al.* (1999), esse método define a antepraia superior como a região em que erosão e acreção resultam em mudanças significativas na elevação do fundo em um ano típico. O limite da antepraia inferior, no entanto, é menos preciso e varia de acordo com a escala de interesse (Stive & De Vriend, 1995). Uma vez que o tamanho do sedimento na profundidade de  $h \approx 1.5h_c$  é utilizado nos cálculos para os limites da antepraia inferior, as profundidades de fechamento encontradas poderão variar.

A tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros de onda obtidos para a área de estudo, utilizados para os cálculos das profundidades limites da antepraia superior e inferior, bem como essas profundidades. Dados relativos às características do sedimento da antepraia foram extraídos do projeto RevizEE (Figueiredo Jr. & Madureira, 2005), onde admitiu-se a granulometria (D50) de 2,5  $\phi$  para os setores "Torres" e "Capão" e 3  $\phi$  para o setor "Imbé".

### 2.2.3 Dados batimétricos e topográficos

Dados de batimetria a partir de levantamentos realizados entre 1954 e 1957 foram extraídos das cartas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a região de interesse, e dados topográficos foram obtidos a partir de levantamentos LIDAR (*Light Detection And Ranging*) (julho de 2010). Para topografia utilizou-se um Modelo Digital do Terreno (MDT), com dados previamente

tratados (Vianna & Calliari, 2015). Os dados topográficos e batimétricos foram inseridos no programa ArcGis®, onde foram delimitadas três subcélulas de aproximadamente 20 km x 50 km cada uma, para análise. Posteriormente, foram gerados perfis transversais representativos para cada uma das três subcélulas, e em seguida exportados para o programa Microsoft Excel.

Visto que os dados topográficos estavam na altitude geoidal do IBGE de Imbituba, fez-se necessária a correção dos dados originários da carta batimétrica, os quais foram adquiridos ao nível de redução no Porto de Imbituba. Ainda, a fim de estender o perfil topográfico em direção ao continente, incluíram-se dados adquiridos de Figueiredo (2011) por meio de GPS, de Xangrilá a 20 km ao norte de Arroio do Sal, os quais englobam grande parte da área de estudo. Após o ajuste dos dados batimétricos (antepraia), que será explicado com mais detalhe na seção 2.2.4, foi realizada a fusão dos perfis batimétricos e topográficos no programa Microsoft Excel, e os substratos agregados resultantes foram posteriormente utilizados como variável de entrada na simulação do modelo.

### 2.2.4 Ajuste dos dados batimétricos (Perfil de equilíbrio da antepraia)

A forma mais simples de representar o perfil de equilíbrio, a qual se baseia em uma curva única com concavidade voltada para cima é definida pela equação 4:

$$h = Ax^m \quad (4)$$

onde  $h$  é a profundidade da água a uma distância  $x$  a partir da linha e costa,  $A$  é um parâmetro dimensional e  $m$  é um parâmetro adimensional; o parâmetro  $A$  é um coeficiente de escala que controla a inclinação geral do perfil, enquanto o expoente  $m$  determina a forma do perfil.

Contudo, o modelo utilizado no presente estudo baseia-se na equação da antepraia composta (Eq. 5), proposta por Cowell *et al.* (1992), e adaptada a partir da forma simplificada do perfil de equilíbrio da antepraia. O perfil derivado da forma básica da equação 4 é definido por:

Tabela 1. Parâmetros utilizados para o cálculo das profundidades de fechamento superior ( $h_c$ ) e inferior ( $h_i$ ).  
 Table 1. Parameters used to calculate upper ( $h_c$ ) and lower ( $h_i$ ) closure depths.

Setores	$\overline{H}_{sig}$ (m)	$\overline{T}_{sig}$ (s)	$\sigma$ (m)	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	D (m)	$h_c$ (m)	$h_i$ (m)
Torres	1,17	8,04	0,53	9,8	0,000187	8,14	26,41
Capão	1,17	8,04	0,53	9,8	0,000187	8,14	26,41
Imbé	1,17	8,04	0,53	9,8	0,000125	8,14	32,30

$$h = WA_c x^{m_c} + (1 - W)A_i x^{m_i} \quad (5)$$

Na equação acima, os subscritos  $c$  e  $i$  são parâmetros referentes à antepraia superior e inferior, respectivamente, e  $W$  representa a função da zona de transição ponderada, definida pela equação 6:

$$W = \exp \exp \left\{ - \left[ \frac{|\lambda - x| - |\lambda - x|}{\lambda c} \right]^d \right\} \quad (6)$$

em que  $c$  e  $d$  controlam o comprimento e a forma da zona de transição e  $\lambda$  é a extensão da antepraia superior em direção ao oceano.

### 2.2.5 Balanço sedimentar

Foram utilizadas diferentes fontes de dados para a região de estudo (estratigráficos, fotografias aéreas, DGPS), a fim de se obter valores de entrada no modelo - mínimos, médios e máximos - do balanço sedimentar. Esses diferentes valores refletem o balanço sedimentar em horizontes temporais distintos.

Para que se obtivesse uma estimativa de longo prazo (5,5 ka), os perfis stratigráficos de Dillenburg *et al.* (2006) foram utilizados para, a partir da espessura do pacote sedimentar e da área, calcular a taxa em m<sup>3</sup>/m/ano que o sedimento iria depositar para os três setores da área de estudo, conforme equação 7. A largura da barreira foi determinada através da imagem de satélite; a largura da antepraia superior foi definida para o setor "Capão" por meio de perfil stratigráfico de Curumim (Dillenburg *et al.*, 2006), e para os setores de "Torres" e "Imbé"

foi considerado o mesmo dado para largura da barreira e da antepraia superior, por falta de dados stratigráficos dessas regiões. A espessura total dos sedimentos regressivos adotada foi 16,83 m, sendo essa a maior profundidade que depósitos regressivos foram encontrados.

$$V_r = \frac{(BW + SW) \times TRS \times l}{5500} \quad (7)$$

onde,  $BW$  = largura da barreira (m),  $SW$  = largura da antepraia superior (m),  $TRS$  = espessura total dos sedimentos regressivos (m),  $l$  = distância linear da linha de costa (m), e  $V_r$  = taxa total de fornecimento de sedimentos (m<sup>3</sup>/m/ano).

Estimativas de curto prazo do balanço sedimentar foram calculadas, conforme equação 8, utilizando-se dados decadais (1974 a 2000) de fotografias aéreas de Curumim (Esteves *et al.*, 2006) a partir das taxas de deslocamento horizontal do perfil. Os valores obtidos nas taxas de progradação da barreira variaram de 3,0 m/ano a 3,4 m/ano. Além das fotografias aéreas, os mesmos autores, em uma escala anual de mapeamento de linha de costa por DGPS, obtiveram uma taxa média de progradação, estimada por regressão linear de 3,0 m/ano. Desse modo, a taxa de deslocamento horizontal do perfil adotada nesse estudo, para uma estimativa de curto prazo foi 3,0 m/ano, sendo este um valor consonante com as duas formas de obtenção dos dados.

As menores taxas de progradação da linha de costa para a região (0,2 m/ano), ocorridas entre 3,325 ka até o presente (Dillenburg & Barboza, 2009) também foram consideradas, de modo a dispor de um terceiro valor estimado do balanço sedimentar para entrada no modelo. A equação 8 também foi utilizada neste caso.

$$V = C_p (h_d + h_c) \tag{8}$$

onde,  $C_p$  = taxa do deslocamento horizontal do perfil (m/ano),  $h_d$  = altura do cordão de dunas frontais (m),  $h_c$  = profundidade de fechamento da antepraia superior (m), e  $V$  = volume sedimentar (m<sup>3</sup>/m/ano).

Os valores dos parâmetros utilizados para os cálculos dos balanços sedimentares para longo e curto prazos, bem como para o período de menor progradação de linha de costa são apresentados nos quadros 1, 2 e 3, respectivamente (segundo a metodologia de Figueiredo, 2011; Figueiredo et al., 2018, 2020).

Os volumes sedimentares apresentados nos quadros 1 a 3 foram multiplicados por 20 e 80 anos, a fim de que fosse estimado o balanço sedimentar nos horizontes temporais desejados. A tabela 2 apresenta os valores relativos ao balanço sedimentar da área de estudo, calculados para os horizontes temporais de 2040 e 2100, inseridos no modelo RanSTM.

### 2.2.6 Dados de nível do mar

Para a componente do NMM foram utilizados valores regionais de Jackson & Jevrejeva (2016). Foi considerado o cenário mais pessimista, baseado no acréscimo de emissões de gases estufa em relação aos níveis pré-industriais, informado pelo RCP (Representative Concentration Pathway). Este cenário representa as maiores taxas de subida do NMM – RCP 8,5, e a tabela 3 apresenta os dados empregados nas simulações.

A íntegra dos dados da tabela foi utilizada, visto que o modelo permite a entrada de valores mínimos, médios, e máximos nas simulações.

### 2.2.7 Influência da batimetria, balanço sedimentar e geometria dos perfis batimétricos

Primeiramente foi realizada uma simulação padrão, com os parâmetros (topografia, batimetria, NMM e balanço sedimentar) originais dos três setores, a fim de analisar como as variações morfológicas do substrato de cada um

Quadro 1. Valores dos parâmetros utilizados para calcular o balanço sedimentar para longo prazo (5,5 ka), baseados em dados estratigráficos (Dillenburg et al., 2006).

Chart 1. Parameters values used to estimate long term (5.5 ka) sedimentary budget, based on stratigraphic data (Dillenburg et al., 2006).

Parâmetros	Torres	Capão	Imbé
<b>(BW) Largura da barreira (m)</b>	2400	4700	2000
<b>(SW) Largura da antepraia superior (m)</b>	2400	6500	2000
<b>(TRS) Espessura total dos sedimentos regressivos (m)</b>	16,83	16,83	16,83
<b>(V<sub>r</sub>) Taxa total de fornecimento de sedimentos (m<sup>3</sup>/m/ano)</b>	12,85	34,27	8,05

Quadro 2. Valores dos parâmetros utilizados para calcular o balanço sedimentar para curto prazo, baseado em dados de fotografias aéreas e dados de DGPS (1974-2000) (Esteves et al., 2006).

Chart 2. Parameters values used to estimate short term sedimentary budget, based on aerial photographs and DGPS data (1974-2000) (Esteves et al., 2006).

Parâmetros	Torres	Capão	Imbé
<b>(C<sub>p</sub>) Taxa do deslocamento horizontal do perfil (m/ano)</b>	3,0	3,0	3,0
<b>(h<sub>d</sub>) Altura do cordão de dunas frontais (m)</b>	2,7	2,25	3,0
<b>(h<sub>c</sub>) Profundidade de fechamento da antepraia superior (m)</b>	8,14	8,14	8,14
<b>(V) Volume sedimentar (m<sup>3</sup>/m/ano)</b>	32,52	31,17	33,42

Quadro 3. Valores dos parâmetros utilizados para calcular o balanço sedimentar durante o período de menor progradação da linha de costa da área de estudo (3,325 ka - 0) (Dillenburg & Barboza, 2009).

Chart 3. Parameters values used to estimate the sedimentary budget during the period (3.325 ka - 0) with shorter rates of shoreline progradation (Dillenburg & Barboza, 2009).

Parâmetros	Torres	Capão	Imbé
$(C_p)$ Taxa do deslocamento horizontal do perfil (m/ano)	0,2	0,2	0,2
$(h_d)$ Altura do cordão de dunas frontais (m)	2,7	2,25	3,0
$(h_c)$ Profundidade de fechamento da antepraia superior (m)	8,14	8,14	8,14
$(V)$ Volume sedimentar ( $m^3/m/ano$ )	2,2	2,1	2,2

Tabela 2. Volumes sedimentares, em  $m^3/m$ , utilizados como entrada no modelo RanSTM, para os três setores da área de estudo. Os dados apresentados correspondem aos valores mínimos, médios e máximos, para cada setor, nos anos 2040 e 2100.

Table 2. Sedimentary volumes, in  $m^3/m$ , used as input in the RanSTM model for the three study area sectors. The data presented correspond to the minimum, mean and maximum values, for each sector, in the years 2040 and 2100.

Setores	Volume Total ( $m^3/m$ )					
	2040 (x20)			2100 (x80)		
	Mín.	Médio	Máx.	Mín.	Médio	Máx.
Torres	44	257	650,4	176	1028	2601,6
Capão	42	623,4	685,4	168	2493,6	2741,6
Imbé	44	161	668,4	176	644	2673,6

Tabela 3. Dados de nível do mar regionais, utilizados nas simulações de projeção da linha de costa para os anos de 2040 e 2100, entre os setores "Torres" e "Imbé" - RS (Jackson & Jevrejeva, 2016). Os dados apresentados correspondem aos valores mínimos (5-95%), médios, e máximos (95%) de elevação.

Table 3. Regional sea level data, used in shoreline projection simulations for the years 2040 and 2100, between the "Torres" and "Imbé" sectors - RS (Jackson & Jevrejeva, 2016). The data presented correspond to the minimum (5-95%), mean, and maximum (95%) elevation values.

Anos	5-95% (m)	Médio (m)	95% (m)
2040	0,1	0,1	0,18
2100	0,5	0,5	0,9

deles respondem a uma elevação do NMM. As simulações foram realizadas para os horizontes temporais de 2040 e 2100.

Posteriormente, também para 2040 e 2100, foram executadas simulações teste, de modo a quantificar individualmente a influência da batimetria, balanço sedimentar e geometria do perfil batimétrico no recuo da linha de costa, também em condições de aumento do NMM, para cada setor da área de estudo. Nas simulações teste em que se fixou a topografia dos três setores, o perfil topográfico escolhido foi o de "Torres", sendo uma escolha aleatória. A geometria do perfil batimétrico, analisada sob forma de extensão do perfil foi alterada somente

para o setor "Imbé", o qual, teve a profundidade de fechamento da antepraia inferior padronizada com os demais setores, sendo, portanto, reduzida. O setor "Imbé" após padronização da  $h_i$  foi chamado de "Imbé raso". Desse modo, pode-se avaliar a resposta costeira entre os setores, frente à elevação do NMM, desconsiderando a influência de diferenças na extensão dos perfis, avaliando assim, somente a influência da geometria do perfil batimétrico (Simulação 4).

O fluxograma da figura 2 resume as simulações realizadas, bem como os parâmetros testados em cada uma delas, e o setor em que foi aplicada.

## 2.2.8 Testes estatísticos

Foram realizados testes estatísticos para os três setores, e para todas as simulações acima descritas. Com base nas análises estatísticas, fez-se possível avaliar se algum dos setores analisados, ou todos eles, fariam parte da mesma distribuição, sendo considerados iguais entre si, sob condições de mudanças climáticas, e conseqüentemente nos seus respectivos comportamentos de linha de costa.

O fluxograma da figura 3 apresenta as etapas sequenciais da realização dos referidos testes.

## 3 Resultados e discussão

Os perfis topobatimétricos ajustados, obtidos para os três setores, e para o perfil em que "Imbé" teve sua profundidade de fechamento inferior padronizada a "Torres" e "Capão", estão representados na figura 4. A tabela 4, no entanto, apresenta as declividades calculadas (em graus) para os quatro perfis apenas para a região submersa.

Segundo os dados obtidos, quando considerado em sua totalidade, o perfil "Imbé" possui menor declividade, influência de sua maior extensão, visto que a profundidade de fechamento inferior neste perfil é maior do que em "Torres" e "Capão", e que em maiores profundidades as declividades tendem a diminuir. Porém, quando considerado o perfil "Imbé raso", há um claro aumento na declividade do mesmo, evidenciando a forte influência do aumento da granulometria, conseqüentemente da diminuição na profundidade de fechamento inferior e extensão do perfil. Ainda, posteriormente observar-se-á, a influência dessas diferenças nos valores de recuo ou transgressão da linha de costa.

Quando analisados os valores de declividades da antepraia superior, observamos que esses são maiores quando comparados com os valores da antepraia inferior. Isso ocorre, pois, as mudanças na elevação do fundo são geralmente maiores nas proximidades da praia, ocasionadas, sobretudo, pela ação das ondas, e diminuem progressivamente a partir da zona de *surf*, onde

a hidrodinâmica se dá predominantemente através das correntes (Cowell *et al.*, 1999). Além disso, a areia empilhada contra a praia sob condições de acreção é espalhada por uma área muito mais ampla no mar durante os períodos de erosão, afetando diretamente na declividade do perfil, a qual é maior próximo à praia e menor em direção ao mar aberto (Cowell *et al.*, 1999). Isso é facilmente observado ao se analisar a declividade da antepraia inferior do perfil "Imbé", o qual, por ser mais longo, possui o menor valor deste parâmetro.

No que se refere às simulações do comportamento da linha de costa, os valores obtidos são apresentados na tabela 5 em forma de recuo médio (50% de probabilidade de excedência), para os horizontes temporais de 2040 e 2100. Os valores observados a partir da simulação com os dados originais de cada setor refletem a influência da menor granulometria no setor "Imbé", a qual acaba por induzir a um prolongamento do perfil da antepraia. Um perfil mais extenso resulta em menor declividade do substrato, influenciada, sobretudo, pelos valores da antepraia inferior, conseqüentemente, aumentando a erosão costeira, quando em situação de elevação acelerada do NMM. Ainda, os menores valores de recuo da linha de costa observados em "Capão" refletem a maior declividade do perfil neste setor, fortemente influenciada pelo alto valor deste parâmetro na antepraia superior.

A tabela 6 elucida os dados acima, de modo que os apresenta na forma de influência que cada um dos parâmetros analisados exerce no comportamento da linha de costa, em percentual.

Presume-se, a partir da pequena redução no recuo da linha de costa (1,8% e 2%) nos valores projetados para 2040, devido à topografia, respectivamente nos setores "Imbé" e "Capão", e um incremento no recuo de apenas 0,2% no setor "Imbé" para o ano de 2100, que a batimetria e o balanço sedimentar são as variáveis de maior influência no comportamento da linha de costa, seja para médio prazo (2040), mas principalmente em longo prazo (2100).

Tal fato pode ser claramente observado nas figuras 5 a 7, as quais representam os resultados das simulações para os três setores,

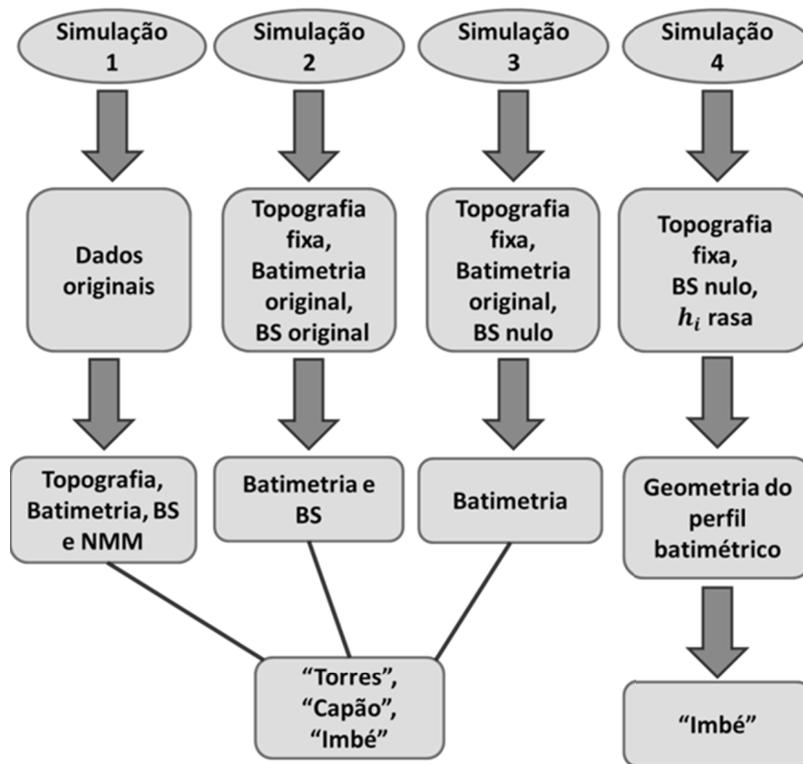


Figura 2. Síntese das simulações realizadas em cada setor da área de estudo, bem como os parâmetros testados em cada uma delas. (BS) = balanço sedimentar; (NMM) = nível médio do mar; ( $h_i$ ) = profundidade de fechamento inferior.  
 Figure 2. Synthesis of the simulations performed in each sector of the study area, as well as the parameters tested in each one of them. (BS) = sediment budget; (NMM) = mean sea level; ( $h_i$ ) = lower closing depth.

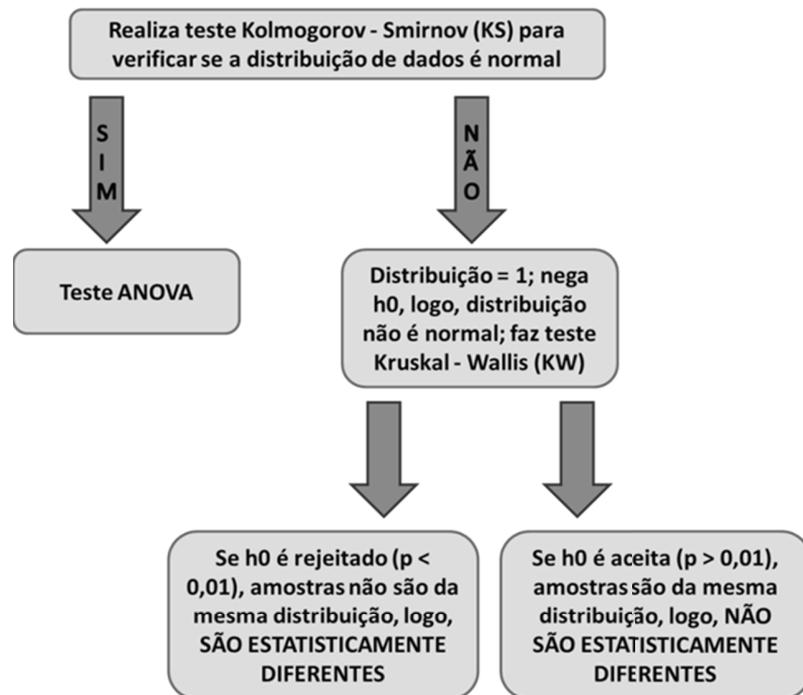


Figura 3. Fluxograma com as etapas seguidas a partir dos dados obtidos através das simulações com o modelo RanSTM.  
 Figure 3. Flowchart with the steps followed from the data obtained through simulations with the RanSTM model.

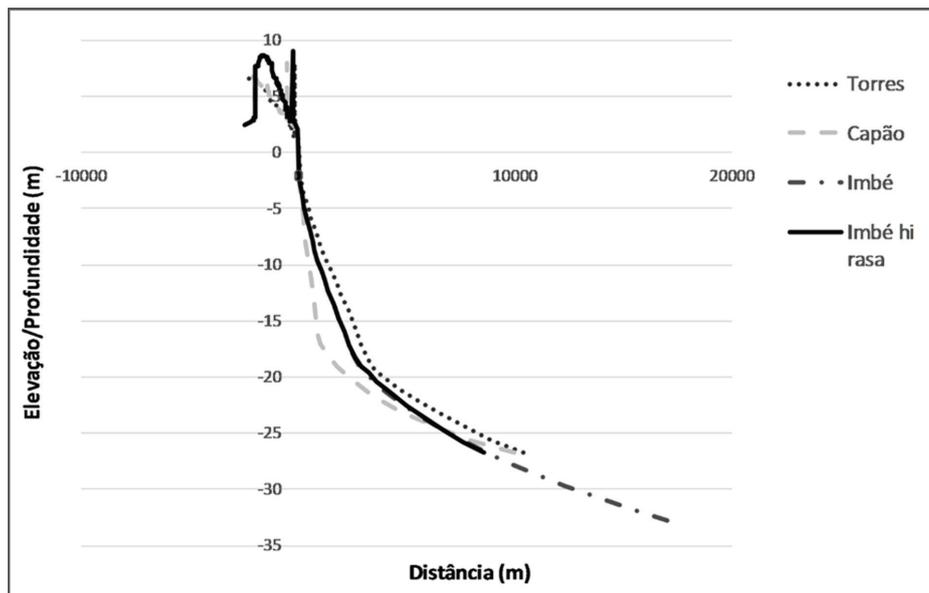


Figura 4. Perfis topobatimétricos ajustados.  
 Figure 4. Adjusted topobathymetric profiles.

Tabela 4. Valores de declividades, em graus, do perfil batimétrico.  
 Table 4. Slope values, in degrees, of bathymetric profile.

Setores	Declividade do perfil total (°)	Declividade da Antepraia Superior (°)	Declividade da Antepraia Inferior (°)
Torres	0,148	0,436	0,112
Capão	0,154	1,157	0,108
Imbé	0,110	0,630	0,085
Imbé raso	0,179	0,630	0,133

Tabela 5. Valores médios de recuo da linha de costa, em metros, para cada simulação realizada. (BS) = Balanço sedimentar.  
 Table 5. Average values of shoreline recession, in meters, for each simulation performed. (BS) = Sediment Budget.

Simulações	2040			2100		
	Torres	Capão	Imbé	Torres	Capão	Imbé
Dados Originais	18m	4,7m	26,6m	97,1m	38,3m	134,4m
Topografia fixa, Batimetria original, BS original	18m	3,9m	25,8m	97,1m	38,3m	134,8m
Topografia fixa, Batimetria original, BS nulo	29,7m	21,9m	35,2m	142,6m	105,9m	167,8m

Tabela 6. Percentual de influência dos parâmetros: topografia, balanço sedimentar e batimetria nos valores médios de recuo da linha de costa.  
 Table 6. Influence percentage of the parameters: topography, sedimentary budget and bathymetry on the mean values of shoreline recession.

Influência no comportamento da linha de costa (%)	2040			2100		
	Torres	Capão	Imbé	Torres	Capão	Imbé
Topografia	0	2	1,8	0	0	0,2
Balanço Sedimentar	28,3	44,2	20,7	24,2	39	16,4
Batimetria	71,7	53,8	77,5	75,8	61	83,4

de forma individual, para os anos 2040 e 2100. Nota-se que o setor "Imbé", o qual apresentou a maior influência da batimetria e a menor importância relativa do balanço sedimentar, nos dois horizontes temporais considerados nesse estudo, foi onde se obteve os maiores valores de recuo da linha de costa, demonstrando novamente a forte influência das variações da geometria do perfil da antepraia, sobretudo de sua declividade (Fig. 5).

O setor "Torres", conforme se observa na figura 6, apresentou influência intermediária, seja da batimetria como do balanço sedimentar, nos valores de recuo da linha de costa. Além disso, também foi o setor que apresentou declividades intermediárias na antepraia, resultando em valores medianos de recuo, situados entre os maiores, obtidos em "Imbé", e os menores, obtidos em "Capão".

Por outro lado, o balanço sedimentar possui grande influência no comportamento da linha de costa do setor "Capão" seja em médio, quanto em longo prazo, reduzindo os valores de erosão costeira (Fig. 7). O referido setor situa-se justamente no centro do embaiamento, onde historicamente foram encontradas as maiores taxas de progradação da linha de costa (Dillenburger *et al.*, 2005), e onde, no presente estudo, foram obtidos os menores valores de recuo da mesma. No entanto, a batimetria permanece sendo o parâmetro de maior influência no comportamento costeiro do setor.

Outro importante ponto a se destacar, é que conforme aumenta o horizonte temporal, a influência do balanço sedimentar diminui em todos os setores. Da mesma forma, a importância relativa da topografia em 2040 para os setores "Capão" e "Imbé", a qual já era muito pequena, no ano de 2100 torna-se praticamente nula. Somado a isso, torna-se evidente o aumento da influência da batimetria no comportamento da linha de costa, conforme se amplia a escala temporal.

Observa-se ainda, a partir dos dados das tabelas 4 e 5, e ilustrados nos gráficos das figuras 5 a 7 que, a menor declividade da antepraia no setor "Imbé" geraria um menor espaço de acomodação quando comparada aos outros dois setores, esperando-se obter um menor recuo

da linha de costa quando da elevação do NMM. Porém, por apresentar um perfil mais longo, embora de menor declividade, obteve-se maiores valores de recuo neste setor. Dessa forma, "Imbé" apresenta-se como um potencial sumidouro de areia das regiões emersas, pois a acomodação produzida por uma determinada elevação do NMM, nesse caso, é potencialmente maior em virtude de maiores distâncias horizontais até a profundidade de fechamento.

Por outro lado, no setor "Capão", onde os gradientes da antepraia são maiores, o espaço de acomodação disponível também seria maior, requerendo mais sedimentos para o preencher, resultando em maiores valores de recuo da linha de costa. Porém, comparativamente ao setor "Imbé", "Capão" possui uma menor profundidade de fechamento, e conseqüentemente uma menor extensão do perfil, requerendo um volume sedimentar menor com a elevação do NM. O setor "Torres", embora apresente a mesma profundidade de fechamento de "Capão", possui um menor gradiente na antepraia, e assim, um pequeno aumento na extensão do perfil, o que faz com que aquele setor apresente um potencial de acomodação maior que "Capão", porém menor que "Imbé". Assim, "Torres" apresentou valores intermediários de recuo da linha de costa. Desse modo, ao considerarmos um cenário de mudanças climáticas, observou-se que, embora setores com menor declividade na antepraia, que teriam um potencial de acomodação menor, resultando em menores recuos da linha de costa, apresentaram-se mais suscetíveis aos efeitos da elevação do NM, devido às maiores extensões dos perfis até a profundidade limite, a qual ocasionou maior espaço disponível para acomodação, gerando assim, maiores taxas de retrogradação costeira.

Pode-se, portanto, estabelecer uma relação com os dados obtidos através das simulações realizadas para avaliar o comportamento da linha de costa de Torres a Imbé no presente estudo e o que fora alcançado por Dillenburger *et al.* (2000) e Esteves *et al.* (2004). Embora em longo prazo (últimos 5,5 ka), a barreira de Torres à Imbé tenha progredido, dados de curto e médio prazos mostram uma progradação de Torres a Xangri-lá, mas uma estabilização de Xangri-lá a Tramandaí,

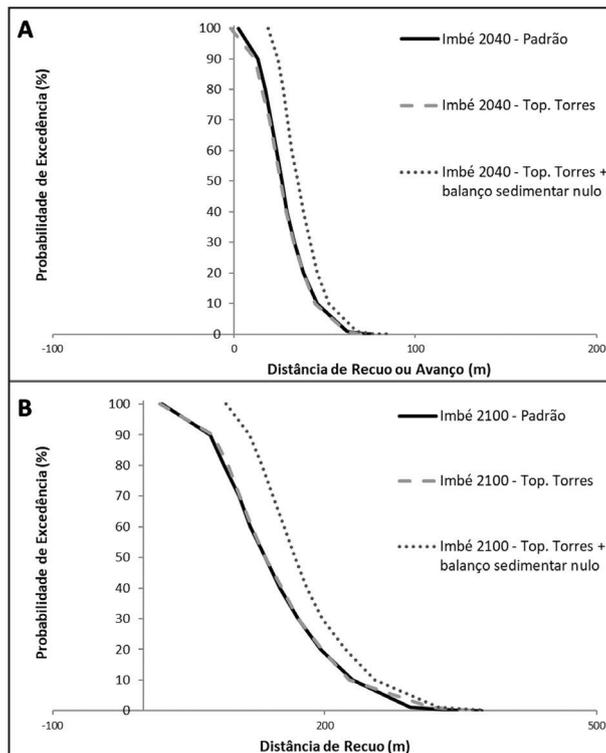


Figura 5. Curvas de probabilidade de excedência para o setor “Imbé” para o horizonte de previsão de 2040 (A) e 2100 (B). Linha contínua: simulação com dados originais; linha tracejada: simulação com topografia de “Torres”, batimetria e BS de “Imbé”; linha pontilhada: simulação com topografia de “Torres”, batimetria de “Imbé” e BS nulo.  
 Figure 5. Exceedence probability curves for the “Imbé” sector for the 2040 (A) and 2100 (B) forecast horizon. Continuous line: simulation with original data; dashed line: simulation with “Torres” topography, bathymetry and BS of “Imbé”; dotted line: simulation with “Torres” topography, “Imbé” bathymetry and null BS.

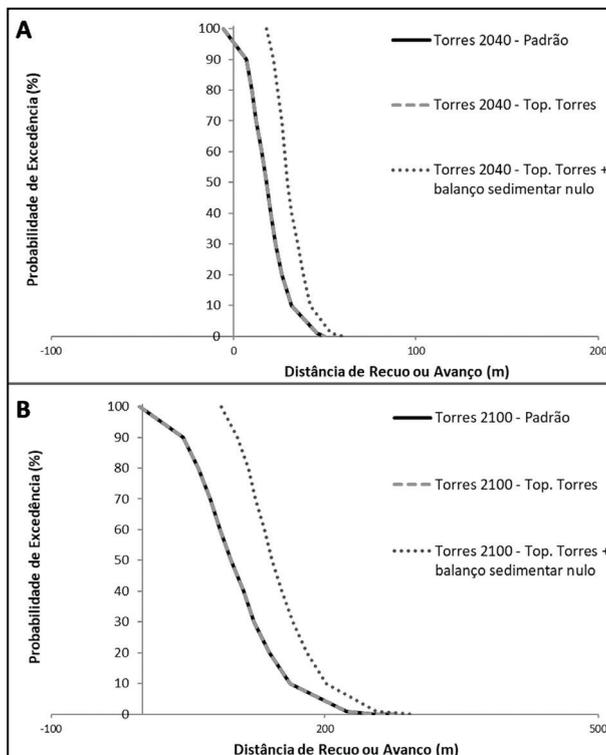


Figura 6. Curvas de probabilidade de excedência para o setor “Torres” para o horizonte de previsão de 2040 (A) e 2100 (B). Linha contínua: simulação com dados originais; linha tracejada: simulação com topografia de “Torres”, batimetria e BS de “Torres”; linha pontilhada: simulação com topografia de “Torres”, batimetria de “Torres” e BS nulo.  
 Figure 6. Exceedence probability curves for the “Torres” sector for the 2040 (A) and 2100 (B) forecast horizon. Continuous line: simulation with original data; dashed line: simulation with “Torres” topography, bathymetry and BS of “Torres”; dotted line: simulation with “Torres” topography, “Torres” bathymetry and null BS.

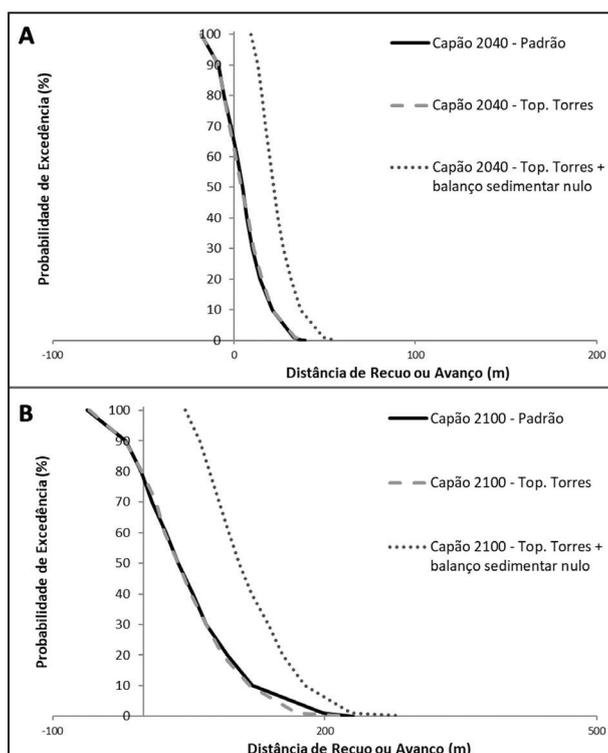


Figura 7. Curvas de probabilidade de excedência para o setor “Capão” para o horizonte de previsão de 2040 (A) e 2100 (B). Linha contínua: simulação com dados originais; linha tracejada: simulação com topografia de “Torres”, batimetria e BS de “Capão”; linha pontilhada: simulação com topografia de “Torres”, batimetria de “Capão” e BS nulo.

Figure 7. Exceedence probability curves for the “Capão” sector for the 2040 (A) and 2100 (B) forecast horizon. Continuous line: simulation with original data; dashed line: simulation with “Torres” topography, bathymetry and BS of “Capão”; dotted line: simulation with “Torres” topography, “Capão” bathymetry and null BS.

além de erosão ao sul da área de estudo. Desse modo, em um cenário de mudanças climáticas, em que a elevação acelerada do NMM foi simulada para 2040 e 2100, e que o balanço sedimentar mostrou ter sua influência reduzida no comportamento da linha de costa, comparado com a batimetria, áreas de maior progradação histórica em situação de estabilidade do NMM apresentaram menores taxas de recuo, e regiões consideradas estáveis apresentaram maiores taxas de recuo.

Nas simulações realizadas apenas para o setor “Imbé”, em que a profundidade de fechamento inferior ( $h_f$ ) foi igualada a dos outros dois setores, portanto mais rasa, mantendo a topografia de “Torres” e o balanço sedimentar nulo, obtiveram-se os seguintes valores de recuo médio: 25 m e 121,1 m, para 2040 e 2100, respectivamente.

A figura 8 agrega os resultados das simulações dos três setores, com a topografia fixa de “Torres”, batimetria original de cada um, e balanço sedimentar nulo, e ainda, a simulação

realizada para o setor “Imbé” com a profundidade de fechamento inferior ( $h_f$ ) mais rasa. Os gráficos representam os anos de 2040 e 2100, respectivamente.

A partir da figura abaixo, observa-se, claramente, que a redução da profundidade de fechamento inferior observada no setor “Imbé raso” proporciona uma diminuição nos valores de recuo da linha de costa. Esses valores são de aproximadamente 29% para o ano de 2040, e 28% para o ano de 2100, quando comparados com o setor “Imbé”.

Tais valores refletem a influência da menor granulometria no setor “Imbé”, a qual acaba por induzir a um prolongamento do perfil da antepraia, aumentando assim o espaço de acomodação. Assim, é necessário mais sedimento para preencher esse espaço, aumentando, conseqüentemente, as taxas de erosão costeira, e causando um maior recuo da linha de costa, frente à elevação do NMM, ao “consumir” os sedimentos da antepraia superior e pós-praia, a fim de retornar ao equilíbrio. Por

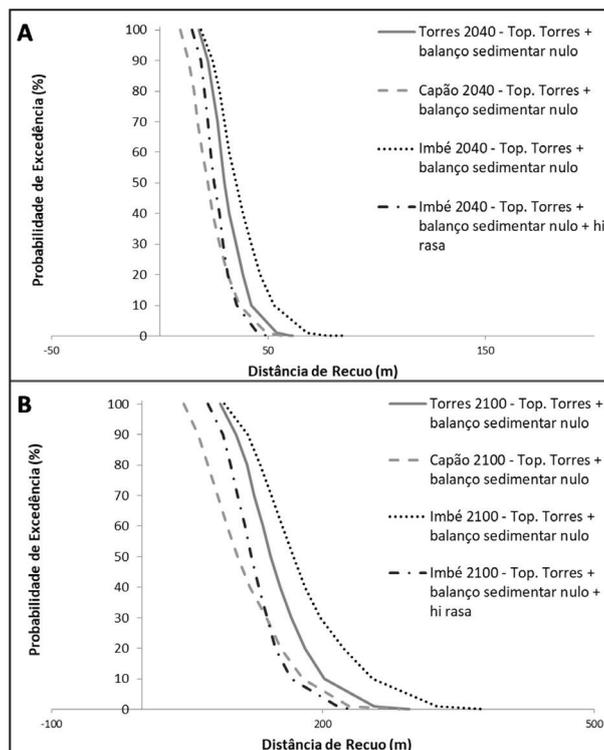


Figura 8. Curvas de probabilidade de excedência para o horizonte de previsão de 2040 (A) e 2100 (B) para os setores "Torres", "Capão" e "Imbé", resultados de simulações com topografia fixa de "Torres" e BS nulo. Linha traço-pontilhada: simulação para o setor "Imbé" com profundidade de fechamento inferior ( $h$ ) mais rasa.

Figure 8. Probability of exceeding curves for the 2040 (A) and 2100 (B) forecast horizon for the "Torres", "Capão" and "Imbé" sectors, results of simulations with fixed topography of "Torres" and null BS. Dash-dotted line: simulation for the "Imbé" sector with shallower lower closing depth ( $h$ ).

outro lado, ao considerarmos uma granulometria mais grosseira, o perfil é encurtado, a declividade aumentada, e as taxas de recuo, conseqüentemente, diminuem.

Pode-se, portanto, constatar a partir das informações expostas acima, que o padrão dos perfis obtidos no presente estudo está em consonância com o que fora obtido por Travessas *et al.* (2005). Estes autores, de modo a reconstruir a linha de costa para três setores adjacentes da costa do RS há cerca de 5,1 ka, simularam uma elevação do nível do mar até 2 m, em relação ao nível atual. As localidades de Tramandaí, Jardim do Éden e Cidreira, obtiveram recuos de 42,378 m, 36,219 m e 31,577 m, respectivamente, demonstrando que as pequenas diferenças nas declividades dos substratos entre os setores, 0,062°, 0,067° e 0,069°, respectivamente, resultaram em consideráveis alterações nos valores de recuo de linha de costa. Tal fato também foi observado entre os setores "Torres", "Capão" e "Imbé" no corrente estudo, em que maiores declividades do substrato (0,154°) -

mesmo diferenças de poucos minutos de grau -, representaram menores valores de recuo da linha de costa (4,7 m e 38,3 m para 2040 e 2100, respectivamente) durante uma elevação acelerada do NMM. O oposto é verdadeiro, onde menores declividades do substrato (0,110°), representaram maiores valores de recuo da linha de costa (26,6 m e 134,4 m para 2040 e 2100, respectivamente). Dillenburg *et al.* (2000) também constataram o mesmo padrão no comportamento da linha de costa ao longo de todo o litoral do estado do RS.

Ainda, a partir da figura 8, nota-se que, conforme o horizonte temporal é ampliado, aumenta também a diferença de recuo entre os setores. Tal diferença deve-se, sobretudo, à influência crescente da batimetria dos perfis no comportamento da linha de costa em longo prazo, ao passo que o balanço sedimentar teve sua influência reduzida na resposta costeira, frente a uma elevação do NMM. Esse fato também fora constatado no estudo de Travessas *et al.* (2005), no qual as simulações realizadas

permitiram concluir que a declividade do substrato é o parâmetro de maior influência no recuo das barreiras arenosas, nas situações de rápida elevação do NMM. Por outro lado, quando em condições de estabilidade ou elevação muito lenta, o balanço de sedimentos destaca-se como o parâmetro de maior influência (Roy *et al.*, 1994). No trabalho de Travessas *et al.* (2005), foi assumida uma taxa de elevação do NMM de, em média 1,2cm/ano, entre 8,5 ka e 5,1 ka, considerada rápida, sobretudo quando comparada às baixas taxas de descida (0,04 cm/ano) que sucederam a esse período (Corrêa, 1996). A mesma taxa de elevação do NMM (1,2 cm/ano) foi obtida por Dillenburg *et al.* (2000) entre 9,5 ka e 5 ka.

Nesse contexto, e considerando que no presente estudo, as taxas médias de elevação do NMM são consideradas rápidas, 0,5 cm/ano (2040), e 0,63 cm/ano (2100), em relação às baixas taxas médias de descida após o máximo da TMP, conclui-se que, os dados obtidos na atual pesquisa, bem como os utilizados para simular o comportamento da linha de costa frente a uma elevação do NMM demonstram que a declividade da antepraia será o fator preponderante na resposta costeira perante variações no NMM, concordando com as informações publicadas em trabalhos pretéritos para a costa do RS (Dillenburg *et al.*, 2000; Travessas *et al.*, 2005).

Para a costa da Austrália, Kinsela (2007), ao simular a resposta costeira frente às mudanças climáticas nos estuários do Lago Macquarie e Lago Tuggerah, no estado de New South Wales, obteve dados similares aos encontrados por Travessas *et al.* (2005). O Lago Macquarie apresentou taxas de recuo médio da linha de costa sempre maiores que o Lago Tuggerah, independente do horizonte temporal simulado. Esses valores foram atribuídos ao substrato de gradiente mais baixo, ausência de truncamento de recife, e dunas comparativamente menores no Lago Macquarie, o que resultou em uma maior taxa de recuo. Ainda, o autor, ao comparar as variações na morfologia de dunas com as de morfologia da antepraia, constatou que a última possui maior controle sobre as diferenças na resposta costeira nesses dois embaiamentos. Tal conclusão é similar à obtida na corrente

pesquisa, onde se observou que a topografia tem papel irrelevante no recuo da linha de costa, bem como o balanço sedimentar, papel secundário, comparados à batimetria da antepraia.

Com relação aos testes estatísticos realizados, nenhuma combinação de parâmetros testada para os três setores apresentou distribuição de dados normal, fazendo-se necessária a realização, portanto, do teste Kruskal - Wallis, em que se obteve um nível de significância ( $p$ ) menor que 0,01 ( $p < 0,01$ ) em todos eles. Desse modo, as amostras nos casos simulados para 2040 e 2100: (1) substratos e balanços sedimentares originais; (2) topografias fixas, batimetrias e balanços sedimentares originais; (3) topografias fixas, batimetrias originais e balanços sedimentares nulos; (4) comparação do caso "3" para os três setores com o setor "Imbé" apresentando  $h_i$  mais rasa; são estatisticamente diferentes entre si, não pertencendo à mesma distribuição.

A figura 9 exemplifica um dos casos em que as amostras não se sobrepõem. Os valores 1, 2, 3 e 4 representados no eixo das ordenadas são respectivamente os setores "Torres", "Capão", "Imbé" e "Imbé" com  $h_i$  mais rasa. As linhas pontilhadas indicam o setor que está sendo testado. Caso houvesse amostras da mesma distribuição, o que não ocorreu em nenhum dos testes realizados, o marcador representando o setor estatisticamente igual ao analisado mudaria de cor.

Os testes estatísticos realizados comprovam que, mesmo dentro do suave embaiamento, região que *a priori* poderia ser considerada morfodinamicamente homogênea, os setores possuem comportamentos bastante distintos entre si, refletindo em diferentes valores de recuo, apresentados anteriormente, e os quais podem ser visualizados nas figuras 10 a 12.

Os mapas de recuo da linha de costa abaixo ilustram as simulações realizadas para os três setores, para os anos de 2040 e 2100, em que foram utilizados os dados originais de cada um deles. São apresentados os contornos referentes à linha de costa atual, em que se considerou a base das dunas, bem como às probabilidades de ocorrência de 10% e 50% de recuo da linha de costa para os dois horizontes temporais.

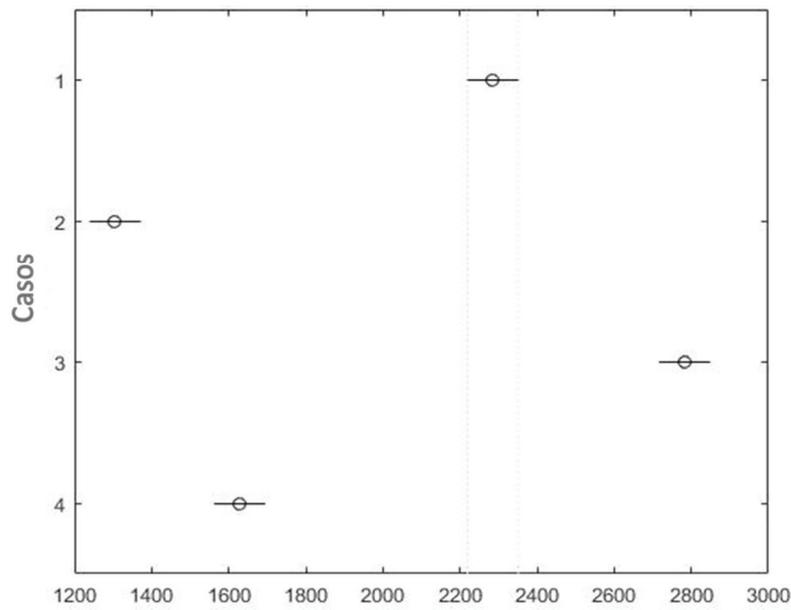


Figura 9. Representação gráfica do teste Kruskal – Wallis (KW), com todas as amostras estatisticamente distintas.  
Figure 9. Graphical representation of the Kruskal - Wallis (KW) test, with all statistically distinct samples.

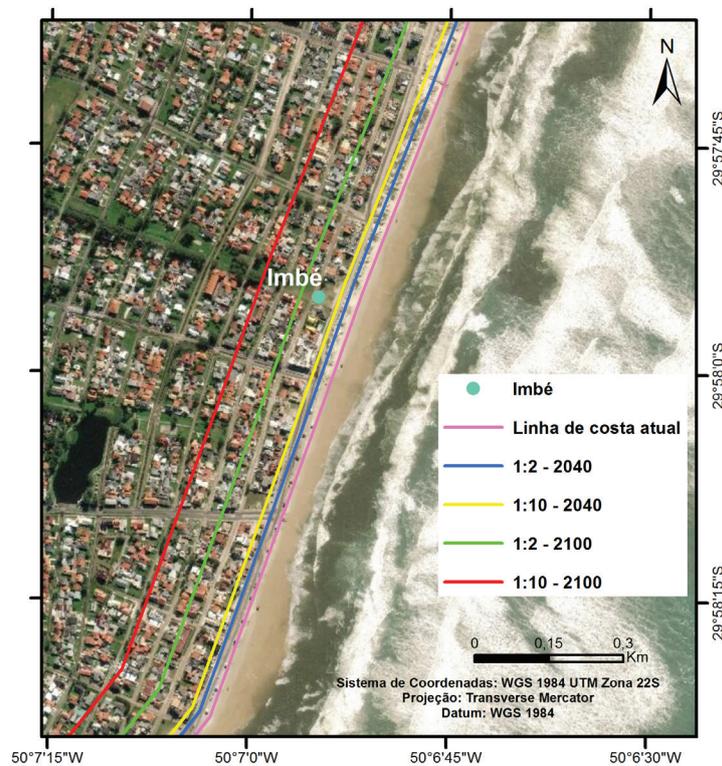


Figura 10. Contornos representando a distância de recuo a ser provavelmente excedida em 2040 e 2100, na área do Setor "Imbé". Distâncias modeladas a partir da base da duna atual.  
Figure 10. Contours representing recession distance likely to be exceeded at different levels of risk by 2040 and 2100 forecasts at the area of "Setor Torres". Recession distances were modelled from the present day foredune line.

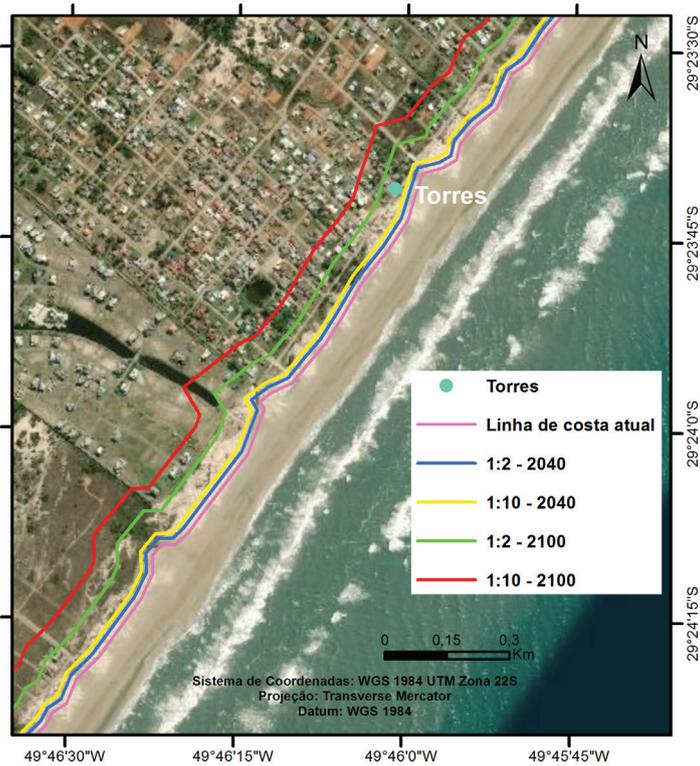


Figura 11. Contornos representando a distância de recuo a ser provavelmente excedida em 2040 e 2100, na área do Setor "Torres". Distâncias modeladas a partir da base da duna atual.  
*Figure 11. Contours representing recession distance likely to be exceeded at different levels of risk by 2040 and 2100 forecasts at the area of Setor "Torres". Recession distances were modelled from the present day foredune line.*

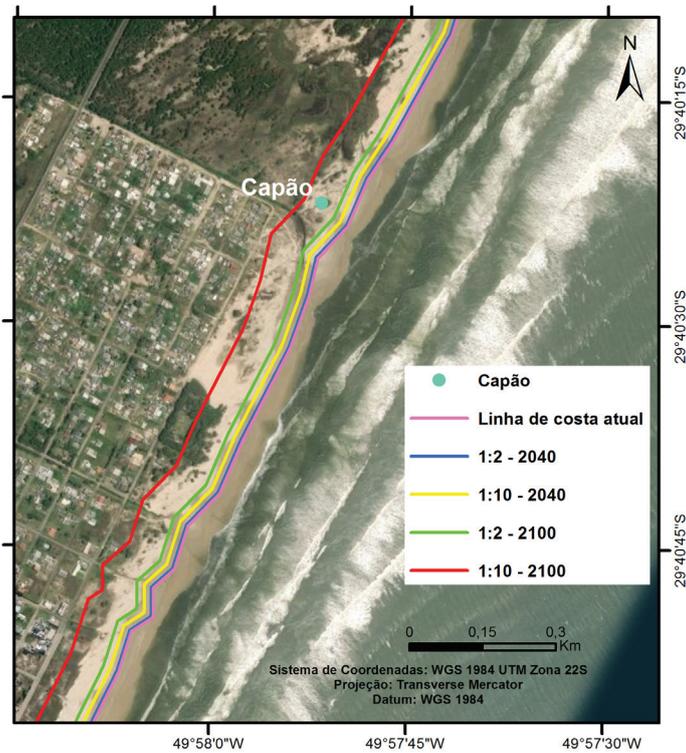


Figura 12. Contornos representando a distância de recuo a ser provavelmente excedida em 2040 e 2100, na área do Setor "Capão". Distâncias modeladas a partir da base da duna atual.  
*Figure 12. Contours representing recession distance likely to be exceeded at different levels of risk by 2040 and 2100 forecasts at the area of Setor "Capão". Recession distances were modelled from the present day foredune line.*

Diante do exposto, e sabendo-se que o litoral entre Torres e Imbé é predominantemente urbanizado, composto por moradores fixos e, sobretudo flutuantes, em época de veraneio, tal fato torna a região altamente vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas globais. Somado a isso, visto que a batimetria da antepraia evolui através da relação entre erosão e deposição, e que os diferentes setores do suave embaçamento se comportam de maneira bastante distinta, é de extrema importância o estudo detalhado da área mencionada, a fim de avaliar as respostas morfológicas dessa região costeira frente à elevação do NMM.

#### 4 Conclusões

Dentre as conclusões, destaca-se que a antepraia demonstrou exercer controle principal na resposta costeira, e conseqüentemente na posição da linha de costa, durante o aumento do NMM. Para os futuros cenários projetados, as diferenciações morfológicas de cada setor certamente serão relevantes e deverão ser consideradas, respeitando as individualidades de cada um, pois cada setor da área de estudo responde de maneira distinta às elevações do NMM.

Foi observado que o recuo da linha de costa varia significativamente, entre setores, devido às variações da morfologia da antepraia, especialmente em maior escala temporal (2100); os maiores valores de recuo da linha de costa foram verificados nas extremidades do embaçamento, onde a antepraia apresenta as menores declividades, comparativamente à porção central, onde são encontradas as maiores declividades; as maiores taxas de recuo da linha de costa (1,33 m/a e 1,68 m/a) foram verificadas no setor "Imbé" e as menores taxas (0,24 m/a e 0,48 m/a) no setor "Capão", respectivamente para os anos de 2040 e 2100; o balanço sedimentar apresentou um papel secundário no recuo, porém, com mais relevância no setor central; por fim, foi observado que a topografia das dunas apresentou papel irrelevante no recuo da linha de costa, em médio e longo prazos.

#### Referências

- Bitencourt, V.J.B. & Dillenburg, S.R. 2020. Application of multivariate statistical techniques in alongshore differentiation of coastal barriers. *Marine Geology*, 419: 1-14.
- Bose, M. de A. 2019. *Os efeitos da elevação do nível do mar e do balanço sedimentar em um Hotspot erosivo*. Rio Grande, 59p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Oceanologia, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.
- Bruun, P. 1962. Sea-level Rise as a Cause of Shoreline Erosion. *Journal of Waterways & Harbor Division*, 88: 117-130.
- Bruun, P. 1988. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two-and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, 4(4): 627-648.
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D. & Unnikrishnan, A.S. 2013. Sea Level Change. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York, Cambridge University Press, p. 1137-1216.
- Corrêa, I.C.S. 1996. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP. l'exemple de la plate-forme continentale du Rio Grande do Sul-Brésil. *Marine Geology*, 130: 163-178.
- Cowell, P.J., Roy, P.S. & Jones, R.A. 1992. Shoreface Translation Model: Computer simulation of coastal-sand-body response to sea-level rise. *Mathematics and Computers in Simulation*, 33: 603-608.
- Cowell, P.J., Roy, P.S. & Jones, R.A. 1995. Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model. *Marine Geology*, 126: 45-61.
- Cowell, P.J., Hanslow, D.J. & Meleo, J.F. 1999.

- The Shoreface. In: Short, A.D. (Ed.). *Beaches & Shorefaces Morphodynamics*. New York, John Wiley & Sons, p. 1–54.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Roy, P.S., Kaminsky, G.M., Buijsman, M.C., Thom, B.G. & Wright, L.D. 2001. Shoreface Sand Supply to Beaches. In: INTERNATIONAL COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 27, 2001, Sydney. *Proceedings...* Sydney, p. 2495–2508.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niedoroda, A.W., Vriend, H.J. De, Swift, D.J.P., Kaminsky, G.M. & Capobianco, M. 2003a. The Coastal-Tract (Part 1): A Conceptual Approach to Aggregated Modeling of Low-Order Coastal Change. *Journal of Coastal Research*, 19(4): 812–827.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niedoroda, A.W., Swift, D.J.P., De, H.J., Buijsman, M.C., Nicholls, R.J., Roy, P.S., Kaminsky, G.M., Reed, C.W., Boer, P.L. De, Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niedoroda, A.W., Swift, D.J.P., Vriend, H.J. De, Buijsman, M.C., Nicholls, R.J., Roy, P.S., Kaminsky, G.M., Cleveringas, J., Reed, C.W. & Boer, P.L. De. 2003b. The Coastal-Tract (Part 2): Applications of Aggregated Modeling of Lower-order Coastal Change. *Journal of Coastal Research*, 19(4): 828–848.
- Cowell, P.J., Thom, B.G., Jones, R.A., Everts, C.H. & Simanovic, D. 2006. Management of Uncertainty in Predicting Climate-Change Impacts on Beaches. *Journal of Coastal Research*, 22: 232–245.
- Curry, J.R. 1964. Transgressions and Regressions. In: Miller, R.C. (Ed.). *Papers in Marine Geology*. New York, McMillan, p. 175–203.
- Dean, R.G. 1991. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1): 53–84.
- Dean, R.G. & Maurmeyer, E.M. 1983. Models of beach profile response. In: Komar, P. & Moore, J (Eds.). *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Boca Raton, Florida, CRC Press, p. 151–165.
- Dillenburg, S.R., Roy, P.S., Cowell, P.J. & Tomazelli, L.J. 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16(1): 71–81.
- Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Martins, L.R. & Barboza, E.G. 2005. Modificações de longo e curto período da linha de costa das barreiras do Rio Grande do Sul. *Gravel*, 3: 9–14.
- Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P. & da Silva, D.B. 2006. Stratigraphy and evolution of a prograded transgressive dunefield barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, (SI39): 132–135.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P., Clerot, L.C.P. & Ayup-Zouain, R.N. 2009. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: Dillenburg, S.R., Hesp, P.A. (Eds.). *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, p. 53–91.
- Dillenburg, S.R. & Barboza, E.G. 2009. Long- and short-term progradation of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, (SI56): 599–601.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Caron, F. & Sawakuchi, A.O. 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7–6 ka. *Marine Geology*. 390: 106–119.
- Esteves, L.S., Dillenburg, S.R. & Toldo Jr., E.E. 2004. Alongshore Patterns of Shoreline Movements in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, (SI39): 215–219.
- Esteves, L.S., Williams, J.J. & Dillenburg, S.R. 2006. Seasonal and Interannual Influences on the Patterns of Shoreline Changes in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 22(5): 1076–1093.
- Figueiredo, S.A. 2011. *External forcing and internal controls on coastal response to climate change at Rio Grande do Sul, southern Brazil*. Sydney, 164p. Tese de Doutorado, School of Geosciences, University of Sydney.
- Figueiredo, S.A., Calliari, L.J. & Machado, A.A. 2018. Modelling the effects of sea-level rise and sediment budget in coastal retreat at Hermenegildo Beach, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 66(2): 210–219.
- Figueiredo, S.A., Goulart E.S. & Calliari, L.J. 2020. Effects of closure depth changes on coastal response to sea level rise: insights

- from model experiments in southern Brazil. *Geomorphology*, 351: 1-8.
- Figueiredo Jr., A.G. & Madureira, L.S.P. 2005. *Topografia, composição, refletividade do substrato marinho e identificação de províncias sedimentares na Região Sudeste-Sul do Brasil*. São Paulo, Série Documentos REVIZEE - Score Sul, 64p.
- Hallermeier, R.J. 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4: 253-277.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 881p.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 966p.
- Jackson, L.P. & Jevrejeva, S. 2016. A probabilistic approach to 21st century regional sea-level projections using RCP and High-end scenarios. *Global and Planetary Change*, 146: 179-189.
- Jevrejeva, S., Jackson, L.P., Riva, R.E.M., Grinsted, A. & Moore, J.C. 2016. Coastal sea level rise with warming above 2°C. In: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA, 47, 2016. *Proceedings...* PNAS, v. 113, p. 13342-13347.
- Kinsela, M.A. 2007. *Topographic control of dune response to climate-change impacts*. Sydney, 161p. Tese de Doutorado, School of Geosciences, University of Sydney.
- Lima, S.F., Almeida, L.E.S.B. & Toldo Jr., E.E. 2001. Estimativa da Capacidade do Transporte Longitudinal de Sedimentos a partir de Dados de Ondas para a Costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 28: 97-107.
- Martinho, C.T., Dillenburg, S.R. & Hesp, P. 2009. Wave energy and longshore sediment transport gradients controlling barrier evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 25(2): 285-293.
- Nicholls, R.J., Hanson, S.E., Lowe, J.A., Warrick, R.A., Lu, X. & Long, A.J. 2014. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *Wires Climate Change*, 5: 129-150.
- Niedoroda, A.W., Swift, D.J.P. & Hopkins, T.S. 1985. The Shoreface. In: Davis Jr., R.A. (Ed.). *Coastal Sedimentary Environments*. New York, Springer-Verlag, p. 533-624.
- Pilkey, O.H., Young, R.S., Riggs, S.R., Sam Smith, A.W., Wu, H. & Pilkey, W.D. 1993. The Concept of Shoreface Profile of Equilibrium: A Critical. *Journal of Coastal Research*, 9(1): 255-278.
- Roy, P.S., Cowell, P.J., Ferland, M.A. & Thom, B.G. 1994. Wave dominated coasts, In: Carter, R.W.G., Woodroffe, C.D. (Eds.). *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge, Cambridge Press, p. 121-186.
- Stive, M.J.F. & De Vriend, H.J. 1995. Modeling Shoreface Profile Evolution. *Marine Geology*, 126: 235-248.
- Travessas, F. de A., Dillenburg, S.R. & Clerot, L.C.P. 2005. Estratigrafia e Evolução da Barreira Holocênica do Rio Grande do Sul no trecho Tramandaí-Cidreira. *Boletim Paranaense de Geociências*, 57: 57-73.
- Vianna, H.D. & Calliari, L.J. 2015. Variabilidade do sistema praia-dunas frontais para o litoral norte do Rio Grande do Sul (Palmares do Sul a Torres, Brasil) com o auxílio do Light Detection and Ranging – Lidar. *Pesquisas em Geociências*, 42(2): 141-158.
- Zhang, K., Douglas, B.C. & Leatherman, S.P. 2004. Global Warming and Coastal Erosion. *Climate Change*, 64: 41-58.