

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**COTA DE INUNDAÇÃO E RECORRÊNCIA PARA A ENSEADA DO  
ITAPOCORÓI E PRAIA DE MORRO DOS CONVENTOS, SANTA  
CATARINA**

GUILHERME VIEIRA DA SILVA

ORIENTADOR – Prof Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

COORIENTADOR – Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein

BANCA EXAMINADORA: Prof. Dr. Jarbas Bonetti Filho - UFSC

Prof. Dr. João Luis Nicolodi – FURG

Prof. Dr. Leandro Farina - UFRGS

Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito parcial para obtenção do  
Título de Mestre em Geociências

Porto Alegre  
2012

GUILHERME VIEIRA DA SILVA

**COTA DE INUNDAÇÃO E RECORRÊNCIA PARA A ENSEADA DO  
ITAPOCORÓI E PRAIA DE MORRO DOS CONVENTOS, SANTA  
CATARINA**

ORIENTADOR – Prof Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr.

COORIENTADOR – Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul como requisito parcial para  
obtenção do Título de Mestre em  
Geociências

Porto Alegre  
2012

### CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Guilherme Vieira da  
Cota de Inundação e Recorrência para a Enseada do  
Itapocorói e Praia de Morro dos Conventos, Santa  
Catarina / Guilherme Vieira da Silva. -- 2012.  
98 f.

Orientador: Elírio Ernestino Toldo Jr..  
Coorientador: Antonio Henrique da Fontoura Klein.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências,  
Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto  
Alegre, BR-RS, 2012.

1. Cota de Inundação. 2. Wave Run-up. 3. Eventos  
Extremos. 4. Enseada do Itapocorói. 5. Morro dos  
Conventos. I. Toldo Jr., Elírio Ernestino , orient.  
II. Klein, Antonio Henrique da Fontoura, coorient.  
III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha namorada, Aninha, por estar comigo, me aguentar nos momentos de stress, sempre me colocar para cima e ser uma pessoa especial, além, é claro, de revisar o texto;

À minha mãe, por sempre estar do meu lado, me ajudando, incentivando e revisando textos;

Aos meus avós, por me apoiarem sempre, desde o começo quando nem eu sabia direito o que era a oceanografia;

Aos meus irmãos, Camila e Gabriel, por acompanharem, sem entender direito o que eu estava fazendo, mas sempre me dando forças;

Ao meu pai que, depois de algum tempo, entendeu o que era oceanografia e acreditou em mim;

Ao Nino, que, independentemente de qualquer coisa, está sempre alegre, contagiando a todos;

Aos meus tios, Fernando e Jú, por terem ido viajar na hora certa, deixando-me cuidar da casa e da Fiona e me concentrar na dissertação;

À Duda, pela ajuda na dissertação e aos meus (futuros) sogros, Renato e Marizete pelo apoio durante todo o percurso;

À toda a galera que me hospedou em Porto Alegre (estendo o agradecimento aos familiares): Gabriel, Miojo, Vitória e Júlio, se não fosse por vocês, seria tudo mais difícil;

À Clarissa, que muito me ajudou desde quando estava na Espanha e agora que está no Brasil, mais ainda. Acho que agora eu paro de incomodar tanto! Será? MUITO OBRIGADO!

Ao prof. Elírio, pelo acompanhamento e paciência de orientar à distância.

Ao prof. Klein, por me ajudar e ensinar tanto desde o início dessa caminhada.

À Galera do LOC: Os professores Jarbas e Carla, por me “hospedarem”, por terem me ensinado muito durante esse processo, à todos do “nível trófico superior”, em especial ao

Alexandre e Mariela, que estiveram presentes em praticamente todo o processo e, claro a todos do "nível trófico inferior".

Aos que ajudaram nos trabalhos de campo: Ácmon, Camila, Diego, Felipe, Jonas, Mar, Marquinhos, Michel, Sangoi, Turtle.

Ao Matheus e à Aline, por me hospedarem durante os trabalhos de medição de *wave run-up*.

Ao Sangoi (e à Vivi), por participar do projeto e sempre contribuir de forma positiva com o trabalho, além de me hospedar durante a batimetria.

À ENGERA e à CPE por terem cedido dados. Ao pessoal da CPE, que ajudou sempre que possível.

Ao IH Cantábria, à Secretaria do Patrimônio da União, ao projeto CNPQ-CTTrans Proc. No. 575008/2008-3 e Projeto SMC Brasil - MMA por terem cedido dados utilizados neste trabalho e viabilizado os trabalhos de campo.

À CAPES, por ter financiado o projeto.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

Este trabalho apresenta o cálculo da cota de inundação para a Enseada do Itapocorói e para a praia de Morro dos Conventos, litoral do Estado de Santa Catarina. Para atingir os objetivos desse trabalho, a cota de inundação foi calculada através da soma das marés meteorológica e astronômica e do *wave run-up*. Foi utilizada uma base de 60 anos (horária) de dados de marés e ondas, além de dados de batimetria e topografia das praias. Com o intuito de se obter dados mais realistas do *wave run-up*, os parâmetros ondulatórios da base de dados foram transferidos de águas profundas para próximo da costa com a utilização do modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). A Enseada do Itapocorói foi dividida em quatro setores (exposto, semiexposto, semiprotégido e protegido) em função dos diferentes graus de exposição à ação de ondas, sendo as equações calibradas para cada setor. A partir dos resultados para Enseada do Itapocorói, notou-se que quanto mais exposta a praia, melhor as equações existentes representavam o *wave run-up*, assim, para a praia de Morro dos Conventos foi utilizada a equação mais aceita na literatura sem calibração. A cota de inundação instantânea foi calculada para cada hora da série de 60 anos somando-se o *wave run-up* às marés astronômicas e meteorológicas. Sobre a série de cota de inundação instantânea, para ambas as áreas, foi calculada a cota atingida durante 50% do tempo e por eventos extremos com recorrência de 50, 100 e 200 anos. A estas foi adicionada a previsão de elevação do nível do mar de longo prazo para o mesmo período. A cota atingida durante 50% do tempo na Enseada do Itapocorói foi de 1,35 m no setor exposto, enquanto nos setores semiexposto, semiprotégido e protegido foi de 1 m, 0,9 m e 0,7 m respectivamente. Também, o setor exposto foi o que apresentou as maiores cotas atingidas, sendo 3,45 m, 3,85 m e 4,45 m com tempo de recorrência de 50, 100 e 200 anos respectivamente. No setor semiexposto, os valores calculados foram de 2,85 m (50 anos), 3,25 m (100 anos) e 3,9 m (200 anos). No setor semiprotégido, as cotas com tempo de recorrência de 50, 100 e 200 anos foram de 2,65 m, 3,05 m, 3,75 m respectivamente. Já o setor protegido apresentou as menores cotas entre os setores, 2,4 m, 2,85 m e 3,5 m para 50, 100 e 200 anos de tempo de recorrência. Considerando a extensão da área costeira que possui um levantamento de topografia do terreno, 2,4 % da área é inundada durante 50% do tempo, subindo para 26%, 29% e 33% nos casos de recorrência com 50, 100 e 200 anos. A cota atingida na praia de Morro dos Conventos durante 50% do tempo é de 1,1 m, já as cotas calculadas para os tempos de recorrência de 50, 100 e 200 anos foram de 4,2 m, 4,6 m e 5,35 m respectivamente. E, da mesma forma, a área costeira com levantamento topográfico teve 15% de superfície é inundada em 50% do tempo, passando para 85%, 91% e 96% da área total analisada com 50, 100 e 200 anos de tempo de recorrência. A metodologia proposta neste trabalho contribui para o planejamento de zonas costeiras, à medida que indica áreas afetadas por inundação aos eventos extremos. A apresentação de cartas contendo esse tipo de informação em ambiente de SIG facilita a tomada de decisão e o entendimento da área por determinado evento extremo.

Palavras-chave: Cota de Inundação, *Wave Run-up*, Eventos Extremos, Enseada do Itapocorói, Morro dos Conventos.

## ABSTRACT

The goal of this study is to determine the inundation levels at Enseada do Itapocorói and Morro dos Conventos beaches, located in Santa Catarina State. This was accomplished through the calculation of the inundation level as the sum of astronomical and meteorological tides and wave run-up. The database for this study included 60 years of hourly waves and tides, bathymetric and topographic data. The instantaneous sea level has been defined for each hour of the data series through the summation of astronomical and meteorological tides. To determine more realistic wave run-up data, the wave parameters have been propagated to shallower water using the SWAN (Simulating WAVes Nearshore) model. Published equations were used and results were compared with measured data at a headland bay beach (Enseada do Itapocorói); furthermore, the equations have been calibrated for four sectors of the bay (exposed, semi-exposed, semi-protected and protected). Morro dos Conventos is an exposed beach, comparable to those for which the equations have been developed, so the raw, un-calibrated equations were applied for this site. The inundation level was calculated for each hour of the 60 year-long series by summing the run-up values to obtain the instantaneous level. Over the series of inundation levels, the area inundated during 50% of the time, and the return period for this inundation, have been calculated for 50, 100 and 200 years. The sea-level rise prediction for each calculated period has also been incorporated in order to estimate the area likely to be inundated by future events. For Enseada do Itapocorói, the inundation level reached 50% of the time was 1,35 m in the exposed sector, 1 m in the semi-exposed sector, 0,9 m in the semi-protected sector and 0,7 m in the protected sector. The exposed sector demonstrated the highest values of inundation, 3,45, 3,85 and 4,5 m for 50, 100 and 200 years of return period respectively. At the semi-exposed sector, the values calculated were 2,85 (50 years), 3,25 (100 years) and 3,9 (200 years) m. At semi-protected sector, inundation levels for the 50-, 100- and 200-year return period intervals were 2,65, 3,05 and 3,75 m, respectively. At the protected sector the lowest levels were reached: 2,4, 2,85 and 3,5 m for 50-, 100- and 200-year return period intervals. 2,4% of the total area for which topographic data is available would be inundated during 50% of the time, increasing to 26%, 29% and 33% for 50-, 100- and 200-year return periods. At Morro dos Conventos, the level of inundation reaches 1,1 m 50% of the time; for 50, 100 and 200 years the level rises to 4,2, 4,6 and 5,36 m respectively. Approximately 15% of the area for which topographic data is available would be area is inundated during 50% of the time, 85% with a 50 year return period, 91% with a 100-year period and 96% with a 200 year period.

Keywords: Inundation Level, *Wave Run-up*, Extreme Events, Enseada do Itapocorói, Morro dos Conventos.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Localização das áreas de estudo (1 – Brasil, 2 – Santa Catarina). Na região Centro-Norte, a Enseada do Itaocorói (3) e a praia de Morro dos Conventos no litoral Sul do estado (4).....	20
Figura 2 Enseada do Itapocorói. Presença dos depósitos do sistema laguna-barreira III (MDT produzido a partir de pontos cotados da Secretaria do Patrimônio da União). Nota-se o meandramento do rio para contornar essa formação sedimentar e desaguar na porção Sul da enseada.....	21
Figura 3 Situação da praia de Piçarras em novembro de 2011. Parte do calçadão destruído pela força das ondas. Foto: Diego Bitencourt. ....	22
Figura 4 Levantamento dos desastres naturais ocorridos entre janeiro e setembro de 2011 no Estado de Santa Catarina. Fonte: INPE <a href="http://www.inpe.br/crs/geodesastres/desastres5.php">http://www.inpe.br/crs/geodesastres/desastres5.php</a> . ....	23
Figura 5 Estrutura dos capítulos da dissertação. Conexão entre os capítulos para atingir o objetivo geral do trabalho.....	26
Figura 6 Sistema Terra-Lua. Posições da Terra (T1, T2 e T3) e Lua (L1, L2 e L3) em três momentos distintos. Destaca-se o centro da Terra (CT) e o centro de massa (CM) em diferentes momentos. Modificado de Park (2008). ....	29
Figura 7 Forças gravitacional e centrífuga atuantes no sistema Terra-Lua. Modificado de Park (2008). ....	29
Figura 8 Influência do Sol nas marés. Quando o sistema está alinhado, têm-se as marés de sizígia, do contrário, têm-se maré de quadratura. Modificado de Park (2008). ....	30
Figura 9 Distâncias da Lua em relação à Terra durante o perigeu e o apogeu. Modificado de Komar, 1976. ....	30
Figura 10 Inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de órbita ao redor do Sol. Modificado de Komar, 1976. ....	31
Figura 11 Representação vetorial das variações de velocidade e direção do movimento da água no hemisfério Sul com o aumento da profundidade. Fonte: Nunes (2007). ....	33
Figura 12 Variações do nível médio do mar. Em cinza as estimativas do passado, em vermelho e verde os dados medidos e em azul as projeções até 2100. Fonte: IPCC, 2007. ....	34
Figura 13 Metodologia adotada para atingir o objetivo proposto neste capítulo. ....	35
Figura 14 Série de maré para Enseada do Itapocorói. No topo as amplitudes da maré astronômica, no centro às da maré meteorológica e abaixo a amplitude da maré (soma das marés meteorológica e astronômica). ....	37



Figura 15 Série de maré para Morro dos Conventos. No topo as amplitudes da maré astronômica, no centro, as da maré meteorológica e abaixo maré total (soma das marés astronômica e meteorológica).....	38
Figura 16 a) Malha global de reanálise GOW e b) malha de reanálise GPW do litoral brasileiro. (Fonte: de Luca, 2011). .....	41
Figura 17 Localização dos dados de entrada utilizados nos modelos matemáticos. Em vermelho, os locais de aquisição de dados de maré meteorológica, em preto de maré astronômica e em laranja de dados de onda. ....	42
Figura 18 Esquema utilizado para o levantamento batimétrico de detalhe. Destaca-se a posição da antena do GPS-RTK, da sonda e do netbook utilizados no trabalho de campo. Foto: Diego Bitencourt. ....	43
Figura 19 Moto aquática ( <i>jet ski</i> ) utilizada nos levantamentos batimétricos de detalhe ao largo da praia de Morro dos Conventos. É possível observar a haste de suporte do transdutor e a antena de transmissão de dados. (fonte: CPE, 2009). ....	44
Figura 20 Resumo da metodologia de transferência de ondas para a região costeira. ....	45
Figura 21 Casos selecionados a partir da metodologia <i>MaxDiss</i> . Em vermelho estão apresentadas as séries completas, em azul a seleção feita a partir da metodologia <i>Maxdiss</i> (1 e 3- Enseada do Itapocorói, 2 e 4 - Morro dos Conventos). ....	46
Figura 22 Malhas de cálculo utilizadas para propagação no modelo SWAN. ....	47
Figura 23 Local próximo à costa onde foi reconstruída a série de dados de onda, coincidindo com a posição de fundeio do equipamento (ADCP) utilizado para medir ondas. ....	48
Figura 24 Localização dos pontos onde foram adquiridos os dados de onda gerados através das propagações com o modelo SWAN. ....	49
Figura 25 Histograma de altura significativa de onda em águas profundas próximo à Enseada do Itapocorói. ....	51
Figura 26 Rosa direcional de $H_s$ para águas profundas em frente à Enseada do Itapocorói. ....	52
Figura 27 Histograma de altura significativa de onda próxima à costa na Enseada do Itapocorói. ....	53
Figura 28 Rosa direcional de $H_s$ para a Enseada do Itapocorói. ....	54
Figura 29 Histograma de altura significativa de onda em águas profundas mais próximo à praia de Morro dos Conventos. ....	55
Figura 30 Rosa direcional de $H_s$ para águas profundas em frente à praia de Morro dos Conventos. ....	56
Figura 31 Histograma de altura significativa de onda em próximo à praia de Morro dos Conventos - ponto 3. ....	57
Figura 32 Rosa direcional de $H_s$ para águas rasas - ponto 3 - praia de Morro dos Conventos. ....	58

Figura 33 <i>Wave run-up</i> : composto pelo <i>wave set-up</i> e espriamento da onda na face da praia. Modificado de Ruggiero et a. (1997). .....	60
Figura 34 Efeito do <i>wave run-up</i> na praia de Copacabana (RJ). Fonte: <a href="http://extra.globo.com/noticias/rio/ressaca-invade-pistas-da-orla-do-rio-veja-fotos-1909709.html">http://extra.globo.com/noticias/rio/ressaca-invade-pistas-da-orla-do-rio-veja-fotos-1909709.html</a> . .....	61
Figura 35 <i>Wave run-up</i> : elevação máxima da onda acima do nível médio medido para um determinado momento. ....	62
Figura 36 Metodologia utilizada para calibração, validação e cálculo do <i>wave run-up</i> . ....	63
Figura 37 Medição do <i>wave run-up</i> para posterior cálculo da cota de inundação. ....	64
Figura 38 Localização do fundeio do equipamento ADCP e os pontos onde foram medidos <i>wave run-up</i> . Em verde os pontos medidos desde agosto e, em vermelho aquele adicionado em setembro. ....	65
Figura 39 Posição da base RTK. a) sobre o molhe, b) sobre o RN 47. ....	66
Figura 40 Método de medição do <i>wave run-up</i> . Para cada espriamento de onda foi coletado um dado. Foto: Diego Bitencourt. ....	66
Figura 41 Setores de calibração das fórmulas. ....	68
Figura 42 <i>Wave run-up</i> 2% medido no dia 21/09/2011. Nota-se maiores cotas atingidas pelo espriamento das ondas nos perfis mais expostos (P 50, 47, 40 e 25). ....	69
Figura 43 Perfis de praia - Enseada do Itapocorói dia 21/09/2011. ....	70
Figura 44 Relação entre $R_{2\%}$ calculado e $R_{2\%}$ medido para o setor protegido. ....	70
Figura 45 Relação entre $R_{2\%}$ calculado e $R_{2\%}$ medido para o setor semiprotégido. ....	71
Figura 46 Relação entre $R_{2\%}$ calculado e $R_{2\%}$ medido para o setor semiexposto. ....	72
Figura 47 Relação entre $R_{2\%}$ calculado e $R_{2\%}$ medido para o setor exposto. ....	72
Figura 48 Relação entre o <i>wave run-up</i> medido e o calculado através da fórmula de Nielsen e Hanslow (1991). ....	73
Figura 49 Cota de inundação: composta pela soma da maré astronômica, maré meteorológica e <i>wave run-up</i> . ....	75
Figura 50 Metodologia adotada para o cálculo da cota de inundação. ....	76
Figura 51 Método dos máximos anuais. Fonte: García (2008). ....	77
Figura 52 Recorrência da cota de inundação para o setor exposto da Enseada do Itapocorói. Em azul calculada a partir de ondas propagadas até a costa. Em vermelho calculada a partir de dados de onda em águas profundas. ....	78
Figura 53 Recorrência da cota de inundação para o setor protegido da Enseada do Itapocorói. Em azul -calculada a partir de ondas propagadas até a costa. Em vermelho - calculada a partir de dados de onda em águas profundas. ....	79
Figura 54 Área inundada 50% do tempo. Nota-se que praticamente apenas a face da praia é atingida, sendo que toda região do pós-praia não é afetada em condições normais. ....	81

Figura 55 Área atingida por eventos extremos com recorrência de 50 anos somados à elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007). .....	82
Figura 56 Área alagada por eventos extremos com recorrência de 100 anos, somados à elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007). .....	83
Figura 57 Área alagada por eventos com tempo de recorrência de 200 anos somados à projeção pessimista de elevação do nível do mar do IPCC (2007). .....	84
Figura 58 Recorrência da cota de inundação por eventos extremos para Morro dos Conventos. Em azul - calculada a partir de ondas propagadas até a costa e em vermelho, calculada a partir de dados de ondas em águas profundas. ....	86
Figura 59 Área atingida 50% do tempo (baseado nos 60 anos de dados). ....	88
Figura 60 Carta que representa a inundação causada pela soma da elevação do nível do mar, marés astronômica e meteorológica e <i>wave run-up</i> para um tempo de recorrência de 50 anos.....	89
Figura 61 Representação da inundação causada pela soma da elevação do nível do mar, marés astronômica e meteorológica e <i>wave run-up</i> para um tempo de recorrência de 100 anos.....	90
Figura 62 Área atingida por inundação causada pela soma da elevação do nível do mar, marés astronômica e meteorológica e <i>wave run-up</i> para um tempo de recorrência de 200 anos.....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Principais componentes de maré. Modificado de Komar (1976).....	32
Tabela 2 Resolução das malhas de cálculo. ....	47
Tabela 3 Dados obtidos pelo ADCP AWAC durante o período de levantamento de campo no dia 21/09/2011. A partir desses dados foram calibradas as equações propostas por Nielsen e Hanslow (1991).....	67
Tabela 4 Área total analisada na Enseada do Itapocorói, área alagada durante 50% do tempo (entre 1948 e 2008), e áreas alagadas com tempo de recorrência de 50, 100 e 200 anos considerando a elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007).....	
Tabela 5 Área total analisada, área alagada durante 50% do tempo (entre 1948 e 2008), e áreas alagadas com tempo de recorrência de 50, 100 e 200 anos considerando a elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007). ....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS

AWAC – Modelo de ADCP (Acoustic Dopplet Current Profiler) da marca NORTEC AS ® capaz de medir parâmetros ondulatórios;

CAROL - Caracterizacion de Regímenes de Oleaje – Pacote de rotinas de cálculo em MATLAB ® desenvolvida para a caracterização de variáveis oceanográficas definidas a partir de uma série temporal;

CI – Cota de inundação;

Dir – Direção média de ondas;

EQM – Erro quadrático médio (em inglês: RMS);

GEV - Generalized Extreme Value - Função Generalizadora de Extremos utilizada para descrever o comportamento dos eventos extremos ao longo do tempo, bem como a recorrência dos mesmos;

GOS - Base de dados de reanálise de maré meteorológica gerada pelo IH Cantábria;

GOT – Base de dados de reanálise de maré astronômica gerada pelo IH Cantábria;

GOW – Global Ocean Waves – base de dados de ondas gerados a partir de reanálise de dados de vento;

GPS-RTK – Sistema de posicionamento global com correção diferencial em tempo real;

$H_{0rms}$  - Média geométrica da altura de todas as ondas medidas (para gerar um dado horário, por exemplo);

$H_s$  – Altura significativa de onda;

$H_s/L_0$  - esbeltez da onda;

$L_0$  - Comprimento de onda em águas profundas;

M1 - Malha externa utilizada no modelo SWAN;

M2 - Malha intermediária utilizada no modelo SWAN;

M3 - Malha de detalhe utilizada no modelo SWAN;

MA: Maré astronômica;

MaxDiss – Algoritmo utilizado para a seleção de casos de onda baseado na máxima dissimilaridade entre os dados da série;

MM: Maré meteorológica;

MT: Maré total. Soma da maré astronômica com a maré meteorológica;

n (EQM) – Número de amostras levadas em consideração para o cálculo do EQM;

$p(x)$  (RBF)- Polinômio com todas as variáveis utilizadas;

$R_{2\%}$  - *Wave run-up* excedido por 2% dos casos analisados;

$R_{2\%}$  Nielsen e Hanslow (1991) - *Wave run-up* excedido por 2% dos casos calculado através da equação de Nielsen e Hanslow (1991);

$R_{2\% \text{ semiexposto}}$  Equação calibrada para o setor semiexposto;

$R_{2\% \text{ exposto}}$  Equação calibrada para o setor exposto;

$R_{2\% \text{ protegido}}$  - Equação calibrada para o setor protegido;

$R_{2\% \text{ semiprottegido}}$  Equação calibrada para o setor semiprottegido;

RBF – Método de interpolação em função de base radial;

ROMS – *Regional Ocean Modeling System* - Modelo tridimensional de circulação oceânica;

SLP - Pressão atmosférica ao nível do mar;

SWAN – *Simulating Waves Nearshore* - Modelo matemático de propagação de parâmetros ondulatórios;

$\tan\beta_F$  - Referente à declividade da face da praia;

TIN - *Triangulated irregular network* – Modelo digital de terreno composto por rede de triângulos;

$T_p$  – Período de pico de onda;

WAM – *Wave Prediction Model* - Modelo matemático global de previsão de ondulações;

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\| \cdot \|$  (RBF) - Forma euclidiana de RBF;

$a_j$  e  $b$  (RBF) - Coeficientes de ajuste;

$\phi$  (RBF) - Função de base radial;

$x$  (GEV) - Variável aleatória;

$x_i$  (EQM) – Diferença entre o valor calculado e o medido;

$x_j$  (RBF) - Centro de interpolação;

$\eta$  - Elevação instantânea de água;

$\mu$  (GEV) - Parâmetro de localização;

$\xi$  - Parâmetro de similaridade de surfe;

$\xi$  (GEV) - Parâmetro de forma da função;

$\pi$  – Constante matemática (~3,14) que relaciona o diâmetro e o perímetro de uma circunferência;

$\psi$  (GEV) - Parâmetro de escala

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Introdução .....	18
1.1. Área de Estudo .....	19
1.1.1 Enseada do Itapocorói .....	20
1.1.2. Morro dos Conventos.....	24
1.2. Objetivos .....	25
1.2.1. Objetivo Geral.....	25
1.2.2 Objetivos Específicos.....	25
1.3. Limitação do Trabalho .....	25
1.4. Estrutura da Dissertação .....	26
CAPÍTULO 2 – Variações do Nível do Mar .....	28
2.1. Maré Astronômica .....	28
2.2. Maré Meteorológica.....	32
2.3. Nível Médio do Mar .....	33
2.4 Metodologia.....	34
2.4.3. Processamento.....	36
2.5 Resultados .....	37
2.5.1 Enseada do Itapocorói.....	37
2.5.2 Morro dos Conventos .....	38
2.6 Conclusão .....	38
CAPÍTULO 3 – Ondas .....	40
3.1. SWAN .....	40
3.2. Dados utilizados .....	40
3.2.1 Ondas .....	41
3.2.1 Batimetria.....	42
3.3. Metodologia.....	44
3.3.1. Seleção dos Casos ( <i>MaxDiss</i> ) .....	45
3.3.2. SWAN.....	46
3.3.2 Reconstrução da Série - RBF .....	49



3.3.5 Caracterização dos regimes de ondas .....	50
3.4. Resultados .....	50
3.4.1 Enseada do Itapocorói - águas profundas.....	50
3.4.2. Enseada do Itapocorói – próximo à costa. ....	52
3.4.3. Morro dos Conventos - águas profundas .....	54
3.4.4. Morro dos Conventos – próximo à costa.....	56
4.5. Conclusão .....	58
CAPÍTULO 4 – <i>Wave Run-up</i> .....	60
4.1. Metodologia.....	62
4.1.1. Campo Enseada do Itapocorói.....	63
4.1.2. Calibração das equações para praias de enseada.....	67
4.1.3. Validação das equações para praias expostas .....	68
4.1.4. Cálculo do <i>wave run-up</i> .....	69
4.2. Resultados e Discussão .....	69
4.2.2. Calibração das equações para praias de enseada.....	70
4.2.3. Validação das equações para praias expostas .....	73
4.2.4. Cálculo do <i>wave run-up</i> .....	73
4.3. Conclusões .....	74
CAPÍTULO 5 - Cota de Inundação.....	75
5.1. Metodologia.....	76
5.1.1 Cálculo da Cota de Inundação.....	76
5.1.2. Confecção das Cartas de Inundação .....	77
5.2. Resultados e Discussão – Enseada do Itapocorói.....	78
5.3. Resultados e Discussão - Morro dos Conventos .....	85
5.3.1 Cota de Inundação.....	85
5.3.2. Cartas de Inundação.....	86
5.4. Conclusões .....	91
CAPÍTULO 6 – Considerações Finais.....	93
Referências Bibliográficas .....	95

## CAPÍTULO 1 - Introdução

---

Nas últimas décadas têm-se presenciado um aumento considerável não só na frequência e intensidade, mas também nos danos e prejuízos causados pelos desastres naturais (Marcelino, 2007). De acordo com EM-DAT (2011), fenômenos como enchentes e tempestades aumentaram no último século, principalmente a partir da década de 1950. Somente entre 2000 e 2010, no Brasil, foram registradas 37 enchentes, somando 5.467.393 pessoas afetadas e 1280 mortos.

O aquecimento global pode agravar ainda mais esses fenômenos (Pezza e Simmonds, 2005), prejudicando principalmente às populações residentes nas zonas costeiras. De acordo com o Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), a taxa de elevação do nível do mar deve aumentar e, sua média global no próximo século será entre 0,18 m e 0,59 m acima do atual, o que deve influenciar diretamente a população residente nessa zona. Segundo estudos de Komar (1976) e Davis e Fitzgerald (2004), cerca de metade da população mundial vive próxima à costa. No Brasil 48,6% da população vive a menos de 100 km do mar (Deudall e Maul, 2005). McGranahan et al (2007) afirmam ainda que 13 % da população mundial vivem em regiões com cotas inferiores a 10 m.

O relatório do IPCC (2007) aponta uma série de fenômenos como possíveis impactos das mudanças climáticas em função de variações de eventos extremos. Entre esses, é citado o aumento da incidência de níveis do mar extremos (excluindo tsunamis), gerando salinização de águas de irrigação; estuários e sistemas de água doce; decréscimo da disponibilidade de água doce em função da intrusão de águas salinas; aumento do risco de morte e doenças causadas por enchentes; aumento da relação de custo de proteção versus custos de uso da terra e realocação gerando uma potencial migração de populações e infraestruturas. De acordo com Black et al. (2011), citando o exemplo de Bangladesh, até o ano de 2008, 22% dos moradores afetados por enchentes causadas por variações na maré e 16% dos afetados por erosão das margens de rios já migraram para áreas urbanas.

A região Sul do Brasil está sob influência direta da passagem de frentes polares atlânticas e ciclones extratropicais. Esta região vem sofrendo com fenômenos atmosféricos extremos, representados na sua maioria por tempestades severas (Marcelino, 2007). Santa Catarina é um dos Estados brasileiros mais afetados por adversidades decorrentes de características climáticas, como enchentes, estiagens, granizo, atuação do El Niño e La Niña, furacões entre outras. A porção Sul do Estado destaca-se pela ocorrência de enchentes, bem como por ter sofrido com a passagem do furacão Catarina em março de 2004 (ENGERA, 2009).

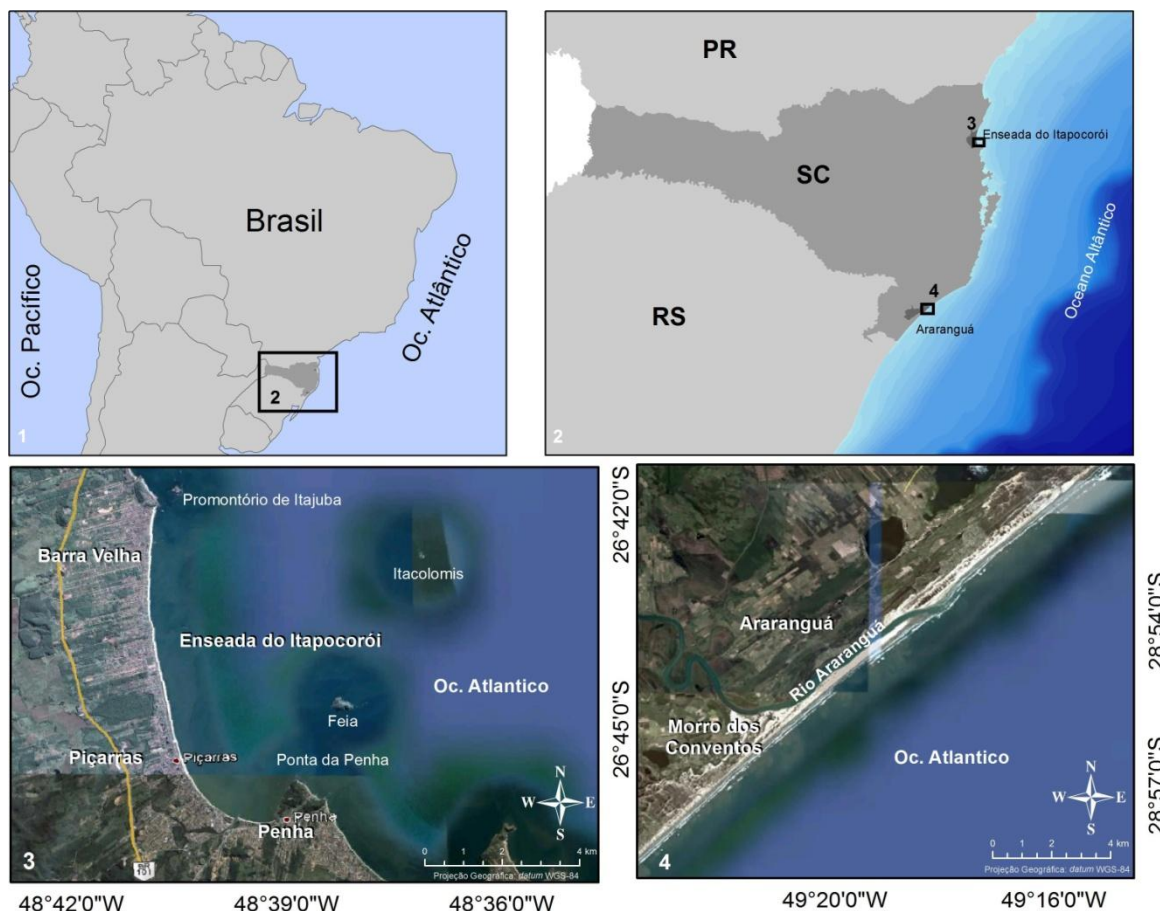
As marés de tempestade, popularmente conhecidas como ressacas, são um tipo de inundação costeira causada pela elevação do nível do mar durante eventos extremos. Esta elevação é causada pelo efeito conjunto de marés e ondas. Entre os anos de 1997 e 2003, foram registrados 26 eventos como esses no litoral catarinense, associados a 11 eventos atmosféricos, sendo o mais significativo o ciclone extratropical ocorrido em maio de 2001, que deixou 6 municípios em situação de emergência e 1 em estado de calamidade pública. Nesta ocasião, 84 pessoas ficaram desabrigadas e 219 foram desalojadas, totalizando 1.900 pessoas afetadas e um prejuízo de R\$ 11.983.832,00 (Herrmann, 2006).

Tendo em vista o aumento da frequência dos fenômenos meteorológicos extremos, e os possíveis impactos (ex. erosão costeira) das mudanças climáticas sob a zona costeira, em particular na área deste projeto, torna-se importante a compreensão dos processos costeiros atuantes nesta região para que sejam criados subsídios técnicos aplicados ao gerenciamento, à ocupação e à tomada de decisão quando de situações de emergência.

Portanto, este trabalho pretende ser uma contribuição para a compreensão da dinâmica e recorrência de eventos extremos no litoral de Santa Catarina, em particular do fenômeno associado às amplitudes das marés astronômica e meteorológica e ao *wave run-up* (combinação de *wave set-up* e excursão vertical da onda na praia).

### 1.1. Área de Estudo

Para o presente trabalho, foram selecionadas duas áreas costeiras com histórico de inundação, sendo uma delas em uma praia exposta, sem a presença de promontórios rochosos, situada ao Sul do Estado de Santa Catarina – Morro dos Conventos – e, a outra em uma região abrigada, uma enseada situada no Centro-Norte do mesmo Estado – Enseada do Itapocorói (Figura 1).



**Figura 1** Localização das áreas de estudo (1 – Brasil, 2 – Santa Catarina). Na região Centro-Norte, a Enseada do Itapocorói (3) e a praia de Morro dos Conventos no litoral Sul do estado (4).

### 1.1.1 Enseada do Itapocorói

A Enseada do Itapocorói é composta pelas praias Alegre (pertencente ao município de Penha), Piçarras (situada na cidade homônima) e Itajuba (localizada na cidade de Barra Velha). A enseada apresenta cerca de 9 km de extensão, sendo delimitada ao Norte pelo promontório de Itajuba e ao Sul pelo Rio Iriri (Araujo, 2008). Signorin (2010), utilizando modelagem numérica a partir de dados de vento, observou que durante os meses de primavera e verão há grande contribuição das ondas de Leste e Sudeste (50% e 40% respectivamente), enquanto nos meses de outono e inverno cresce a importância das ondulações de Sudeste (chegando a quase 60%), sendo a porção Sul da enseada a mais protegida de todas as direções de ondulação em função da presença do promontório da Penha e das ilhas Itacolomis e Feia (Figura 1).

Na porção Sul da enseada, separando as cidades de Penha e Piçarras, está presente o Rio Piçarras. De acordo com Caruso Jr. (1995) antes da construção dos depósitos sedimentares costeiros da Barreira III (Pleistocênica), presente na porção Central e Norte da enseada, o

Rio Piçarras desaguava na mesma latitude de sua nascente, na porção central da enseada. Com a construção da barreira, o curso do rio foi desviado para Sul. Em Piçarras, existe um significativo adensamento populacional onde estão as cotas médias mais baixas do terreno (até 5 m). Já na porção Central e Norte, em função da presença das áreas pleistocênicas, as cotas são mais elevadas em relação às encontradas na porção Sul. Além disso, a vegetação de restinga é mais preservada e as residências encontram-se mais afastadas do perfil ativo da praia. A porção Central da praia apresenta ainda uma leve saliência em função da presença de um afloramento rochoso submarino denominado Laje do Jaques (Figura 2).



Figura 2 Enseada do Itapocorói. Presença dos depósitos do sistema laguna-barreira III (MDT produzido a partir de pontos cotados da Secretaria do Patrimônio da União). Nota-se o meandramento do rio para contornar essa formação sedimentar e desaguar na porção Sul da enseada.

Araujo (2008) sugere que a retificação da desembocadura do Rio Piçarras ocorrida na década de 1970, o desenvolvimento urbano da orla e o consequente aumento da canalização dos esgotos domésticos e pluviais em direção à praia podem ter contribuído para o processo de erosão na porção Sul da enseada. O processo de erosão praiar teve início a partir dessas intervenções e, em meados da década de 1990, a situação tornou-se crítica a ponto da região Sul da enseada, próximo à desembocadura do Rio Piçarras, apresentar praticamente toda porção emersa de praia erodida ao longo de 2 km de extensão. Isto levou o governo municipal, juntamente com a iniciativa privada, a propor e executar, em 1998/99, um aterro hidráulico (Araujo et al., 2010). A obra restabeleceu a linha de costa anterior ao processo erosivo, porém, sem deter a erosão. No ano de 2008 foi realizada a manutenção da obra com sedimentos retirados de jazida localizada em frente à praia Alegre. Com o emprego de uma granulometria de sedimentos incompatível com este tipo de projeto de recuperação da praia, o aterro não cumpriu satisfatoriamente o propósito e, atualmente, a orla se encontra novamente em situação crítica, com parte do calçadão destruído pela ação de ondas (Figura 3).



**Figura 3** Situação da praia de Piçarras em novembro de 2011. Parte do calçadão destruído pela força das ondas. Foto: Diego Bitencourt.

Notícia divulgada em 27 de outubro de 2011 na página da prefeitura de Piçarras na internet (<http://picarras.sc.gov.br>) diz: “O avanço do mar sobre a orla de Balneário Piçarras tem colocado população e autoridades em estado de alerta. Na madrugada de hoje a forte ressaca arrancou árvores e destruiu parte do calçadão da região central da praia. A força das ondas que se chocam contra a calçada ameaça agora a estrutura da Avenida Beira Mar. (...) A luta contra a força do mar que engole a faixa de areia recomeçou em 2008, depois de 10 dez anos da primeira recuperação. Mas o aterro realizado então não resistiu a ressacas frequentes que tornaram a preocupar a população. Em menos de um ano, já se podia ver novamente as ondas se chocando contra o calçadão”. No dia 25 de julho do mesmo ano, a cidade decretou estado de emergência em função de uma forte ressaca que atingiu a orla, provocando desmoronamento de parte do calçadão e comprometendo a infraestrutura da Avenida Beira Mar.

De acordo com o Núcleo de Pesquisa e Aplicação de Geotecnologias em Desastres Naturais e Eventos Extremos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE - 2011), entre os meses de janeiro e setembro de 2011, os municípios que compõem a Enseada do Itapocorói - Barra Velha, Piçarras e Penha- foram os únicos que apresentaram ressaca e inundação brusca (Figura 4), decretando situação de emergência.

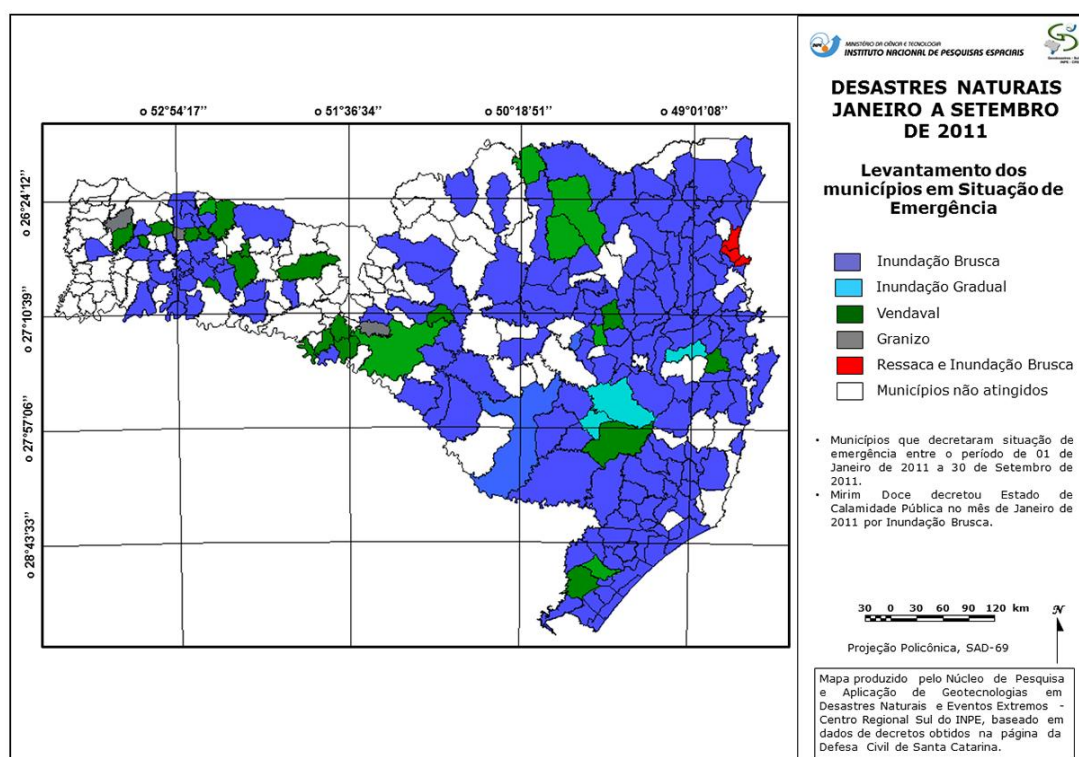


Figura 4 Levantamento dos desastres naturais ocorridos entre janeiro e setembro de 2011 no Estado de Santa Catarina. Fonte: INPE <http://www.inpe.br/crs/geodesastres/desastres5.php>.

### 1.1.2. Morro dos Conventos

A praia de Morro dos Conventos está localizada no município de Araranguá, Sul do Estado de Santa Catarina. Nela está presente a desembocadura do Rio Araranguá. De acordo com D'Aquino e Schettini (2007), a bacia hidrográfica do Rio Araranguá abrange uma área de 3.020 km<sup>2</sup>, sendo esse formado pela união dos Rios Itoupava e Mãe Luiza.

Poucos estudos foram desenvolvidos na região até o momento, podendo-se citar trabalhos de Caruso Jr. (1997), D'Aquino e Schettini (2007), Siegle e Asp (2007), Silva (2009), ENGERA (2009). Siegle e Asp (2007) e CPE (2011) mostraram que na região do Rio Araranguá, as ondas provenientes de Sul (de maior altura e mais frequentes na região), geram transporte de sedimentos ao longo da costa para o Norte. Considerando as intensidades médias para um ano de observações, os autores concluem que o transporte potencial ao longo da costa é fortemente dominado por correntes geradas por ondas no sentido Sul-Norte. O Rio Araranguá apresenta tendência migratória do seu canal no mesmo sentido das correntes (FUNDESPA 2004, Silva 2009). Silva (2009) calculou uma variação de 8 km (durante um período de 70 anos) da posição da desembocadura do Rio Araranguá decorrente desta migração.

Em função da instabilidade da desembocadura e dos fenômenos meteorológicos (chuvas fortes, ondas e marés) que ocorrem na região, a cidade de Araranguá é constantemente atingida por cheias. Por esses motivos, de acordo com a prefeitura do município, a abertura de uma nova barra ocorreu muitas vezes ao longo do último século.

Entre os anos de 1896 e 1897, durante seu governo, Hercílio Luz contratou uma empresa para a abertura do novo canal. Em 1952, os pescadores se uniram e o abriram novamente. Durante o mandato do prefeito Salmi Paladini, no final de 1978, o canal foi novamente aberto com o auxílio do maquinário disponível e mão de obra dos funcionários da prefeitura e de pescadores. No final de 2006, com verba vinda do Ministério da Pesca, o prefeito Mariano Mazzuco Neto contratou uma empresa que iniciou a reabertura do canal, sendo esta finalizada em 2007 com o auxílio de uma draga. No início de 2009, em função das fortes chuvas e da enchente ocorrida no dia 3 de janeiro, foi realizada a abertura de um novo canal, sendo utilizadas uma escavadeira hidráulica, uma carregadeira e uma retroescavadeira.

Considerando as inundações que assolam a população e a grande dinâmica do Rio Araranguá descrita por Silva (2009), a prefeitura da cidade iniciou um plano de retificação da



desembocadura do rio, ainda em fase de projeto, tendo sido finalizados os Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), a Readequação do Projeto Básico e o Projeto Técnico Social.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Geral

Calcular a cota de inundação devido aos eventos meteorológicos marítimos extremos, bem como sua recorrência e a extensão da área costeira atingida.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Obter e analisar dados de reanálise de nível do mar para as áreas de estudo;
- Transferir os parâmetros ondulatórios obtidos através de reanálise de dados de vento para a região de águas rasas;
- Calibrar e validar equações propostas na literatura para o cálculo do *wave run-up*;
- Modificar e aplicar a metodologia desenvolvida por G.I.O.C. (1997) para o cálculo da cota de inundação.

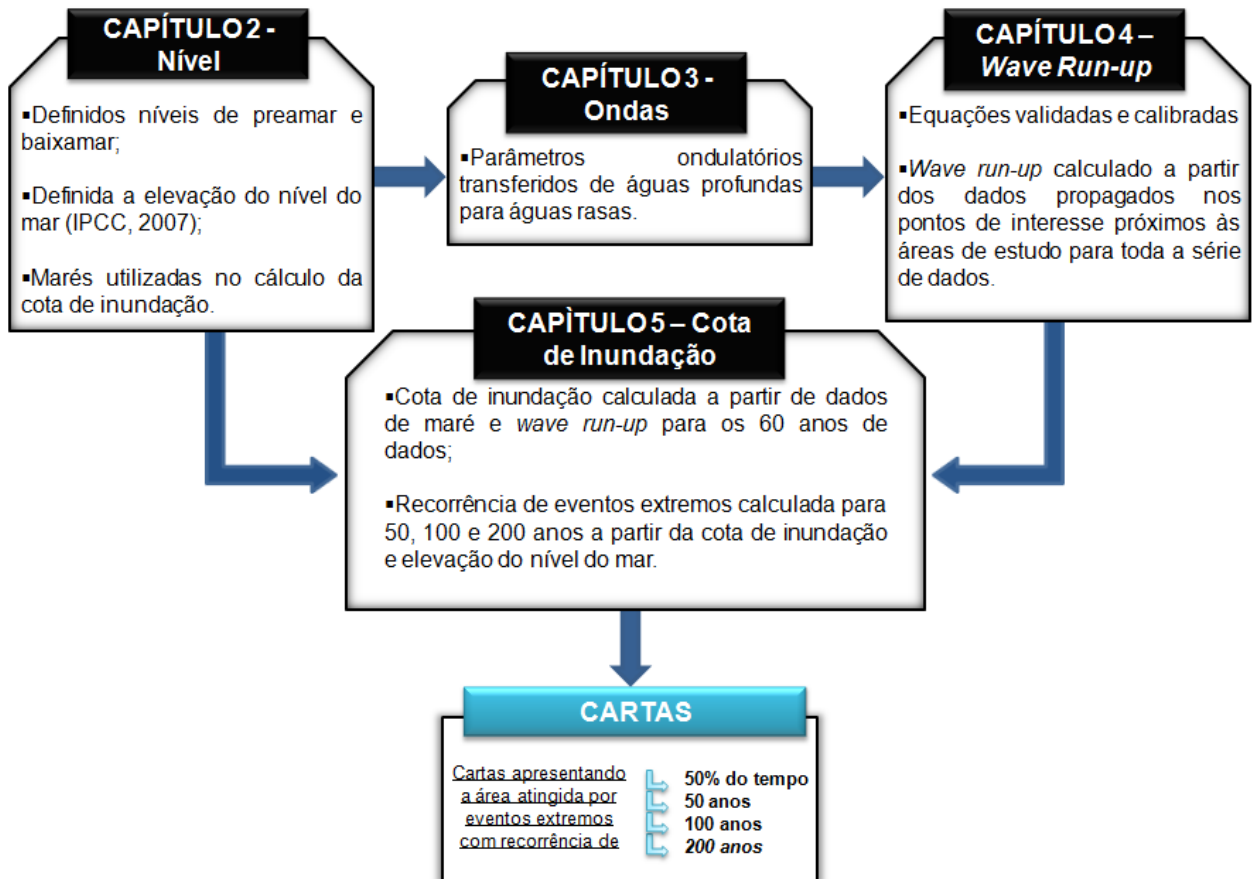
## 1.3. Limitação do Trabalho

A principal limitação deste trabalho está relacionada aos referenciais de nível (RN), uma vez que os dados de maré, batimétricos e topográficos foram obtidos de diferentes fontes. Os dados de maré estão referenciados ao nível médio do período entre 1948 e 2008, os batimétricos (cartas náuticas) estão referenciados ao nível zero adotado pela DHN (média das baixa-mares de sizígia) e os topográficos estão referenciados ao nível zero do IBGE (nível médio entre 1949 e 1957 medido pelo marégrafo localizado no município de Imbituba). Em função da diversidade de dados utilizados e, conseqüentemente das diferentes RN, o trabalho pode apresentar erros que foram minimizados seguindo alguns cuidados:

Considerou-se o nível médio das marés o mesmo que o considerado pelo IBGE, ou seja, o nível zero de Imbituba. Com isso, os valores de maré e topografia puderam ser cruzados. Os dados batimétricos, referenciados à DHN foram utilizados para as propagações dos parâmetros ondulatórios em baixamar. Para as propagações em preamar, foi adicionada a máxima variação da maré astronômica. Posteriormente, ambas as séries (baixamar e preamar) foram interpoladas em função da maré, tornando-os válidos para a aplicação neste trabalho. Contudo, não se descarta a possibilidade de erros nos resultados finais gerados por essa integração de dados.

## 1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada com capítulos divididos em função dos objetivos específicos. Em cada capítulo são apresentados o tema de modo detalhado, os dados utilizados, a metodologia adotada, os resultados obtidos e uma breve conclusão. A relação entre os capítulos é mostrada na Figura 5.



**Figura 5** Estrutura dos capítulos da dissertação. Conexão entre os capítulos para atingir o objetivo geral do trabalho.

Capítulo 1: Introdução, área de estudo e objetivos do trabalho.

Capítulo 2: Revisão sobre marés e modelos matemáticos utilizados para obtenção dos dados e dos resultados para cada uma das áreas.

Capítulo 3: Transferência de ondas para águas profundas para próximo da costa, modelos e metodologias, bem como os resultados para cada uma das áreas.

Capítulo 4: Formulações de *wave run-up* sugeridas na literatura, trabalho de campo desenvolvido para calibração e os resultados.

Capítulo 5: Cálculo da cota de inundação, metodologia e os resultados obtidos.

Capítulo 6: Considerações finais sobre o trabalho.

## CAPÍTULO 2 – Variações do Nível do Mar

---

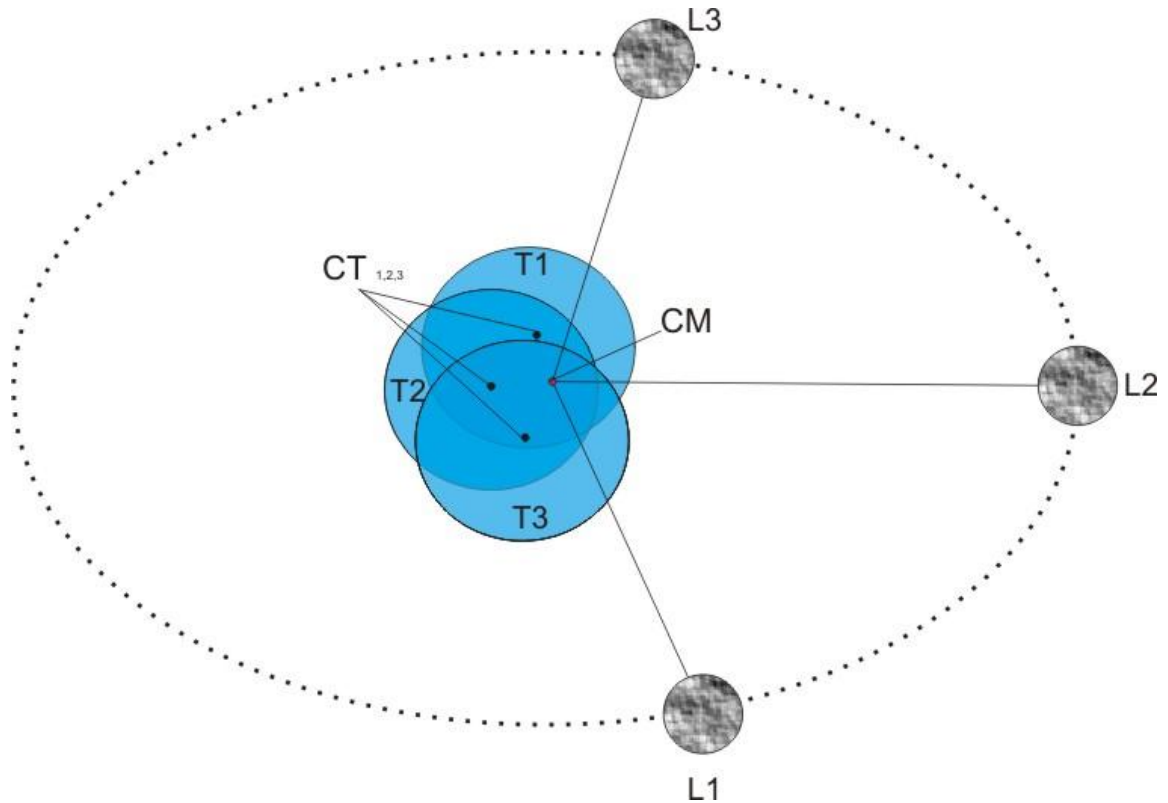
O nível do mar é definido como a cota acima (ou abaixo) de uma referência, e no mar este é influenciado por efeitos gravitacionais da Lua e do Sol à medida que suas posições variam em relação à Terra (Parker, 2005). Variações nos níveis d'água ocorrem também por variações nos ventos, pressão atmosférica, descarga de rios, diferenças de densidade da água, ondas, entre outros fatores não previsíveis, tais como maré meteorológica. Além disso, são conhecidas projeções de elevação do nível médio do mar, como a proposta pelo Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), as quais serão utilizadas neste trabalho para o cálculo da área atingida por inundações em função do tempo de recorrência das mesmas.

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os dados de nível do mar utilizados para o cálculo da cota de inundação (Capítulo 5). Primeiramente, são apresentadas as definições das marés (astronômica e meteorológica), as quais serão o foco do presente trabalho. Salienta-se que as variações do nível do mar causadas por variações de temperatura da água, correntes, descarga de rios ou diferenças de densidade da água não serão consideradas neste trabalho. Na sequência são apresentadas a metodologia adotada e os resultados obtidos.

### 2.1. Maré Astronômica

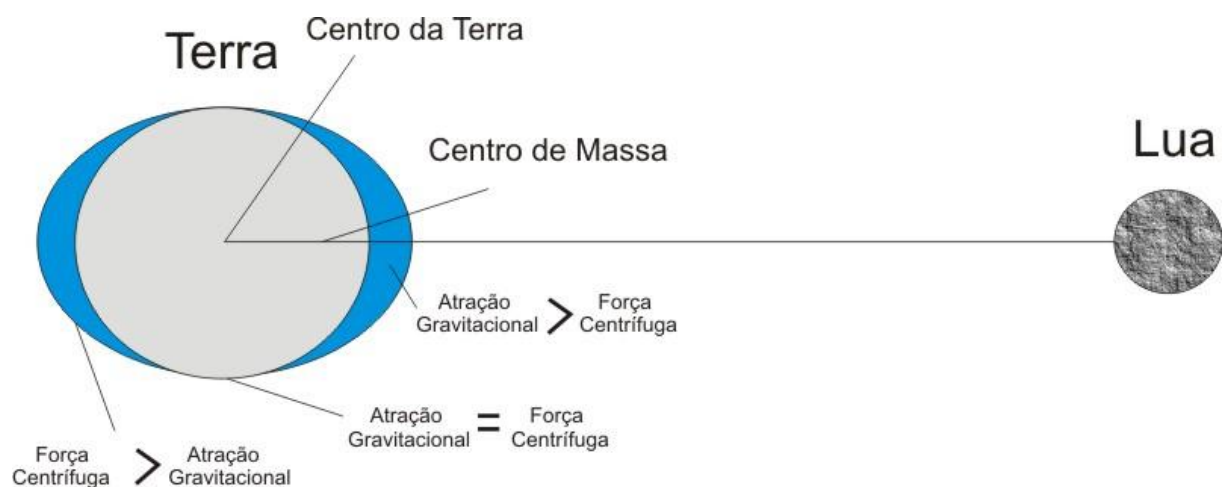
São as mais longas ondas dos oceanos, com centenas de milhares de quilômetros, caracterizadas pela subida e descida rítmicas do nível do mar em um período de meio dia ou um dia. Essas ondas viajam através dos oceanos e são transmitidas para baías, canais, estuários e lagoas ao redor da Terra (Bird, 2008).

Oscilações do nível do mar em função da atração gravitacional do Sol e, principalmente, da Lua e dos efeitos da força centrífuga são bem conhecidos e descritos na literatura. De acordo com Park (2008), a Terra e a Lua se comportam como um sistema que gira ao redor de um centro de massa comum, com período de 27,3 dias de órbita elíptica (Figura 6). O centro de massa do sistema está a aproximadamente 4700 km de distância do centro da Terra. Considerando essa distância, o autor afirma que todos os pontos na Terra também giram ao redor de um centro de massa comum e seguem um caminho elíptico, apresentando a mesma velocidade angular ( $2\pi/27,3$  dias) e também sofrem a mesma força centrífuga (que é proporcional à aceleração em direção ao centro).



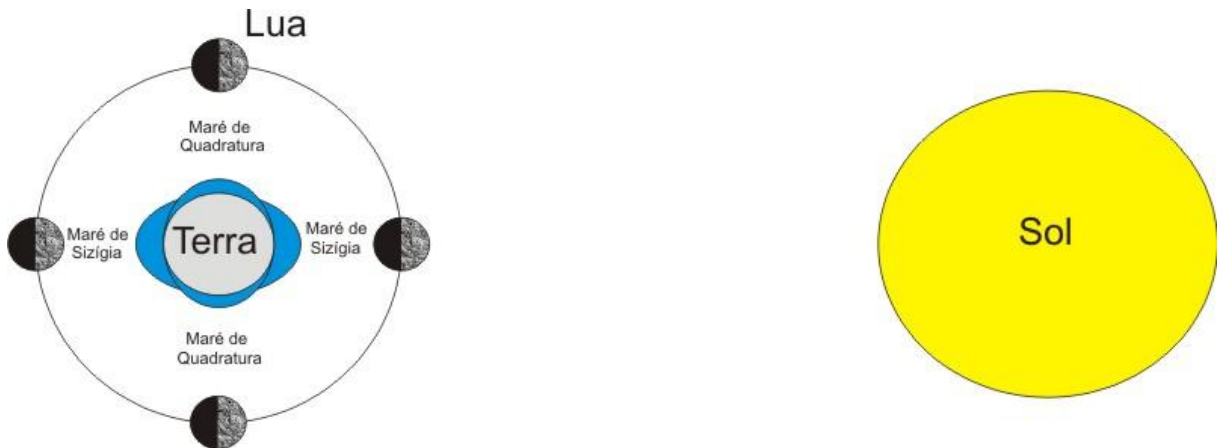
**Figura 6 Sistema Terra-Lua. Posições da Terra (T1, T2 e T3) e Lua (L1, L2 e L3) em três momentos distintos. Destaca-se o centro da Terra (CT) e o centro de massa (CM) em diferentes momentos. Modificado de Park (2008).**

As marés astronômicas são, simplificadaamente (desconsiderando a atração gravitacional entre Terra e Sol), resultado da soma entre a atração gravitacional entre Terra e Lua e da força centrífuga que atua no sistema em movimento (Figura 7). Quando uma das forças (gravitacional ou centrífuga) for superior à outra, têm-se marés altas, quando essas forças forem equivalentes, têm-se marés baixas (Park, 2008).



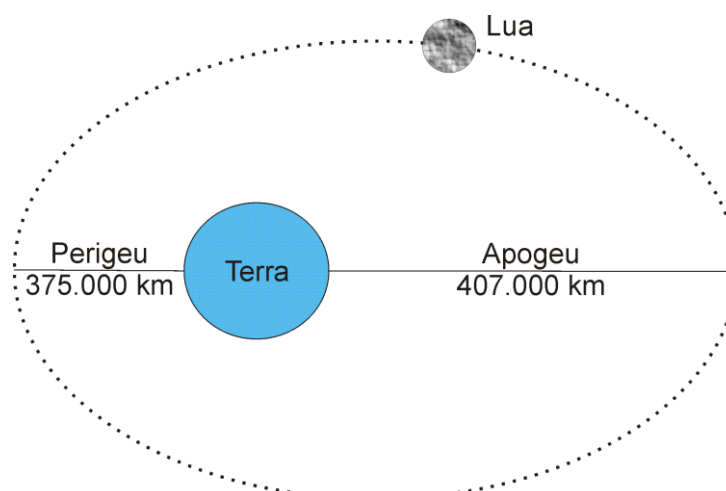
**Figura 7 Forças gravitacional e centrífuga atuantes no sistema Terra-Lua. Modificado de Park (2008).**

Apesar da maior importância da Lua nas marés, o Sol é parte importante do sistema. Quando a Lua, a Terra e o Sol estão alinhados, as forças gravitacional e centrífuga são amplificadas, gerando as marés de sizígia. Por outro lado, quando o sistema não está alinhado, têm-se as marés de quadratura (Figura 8).



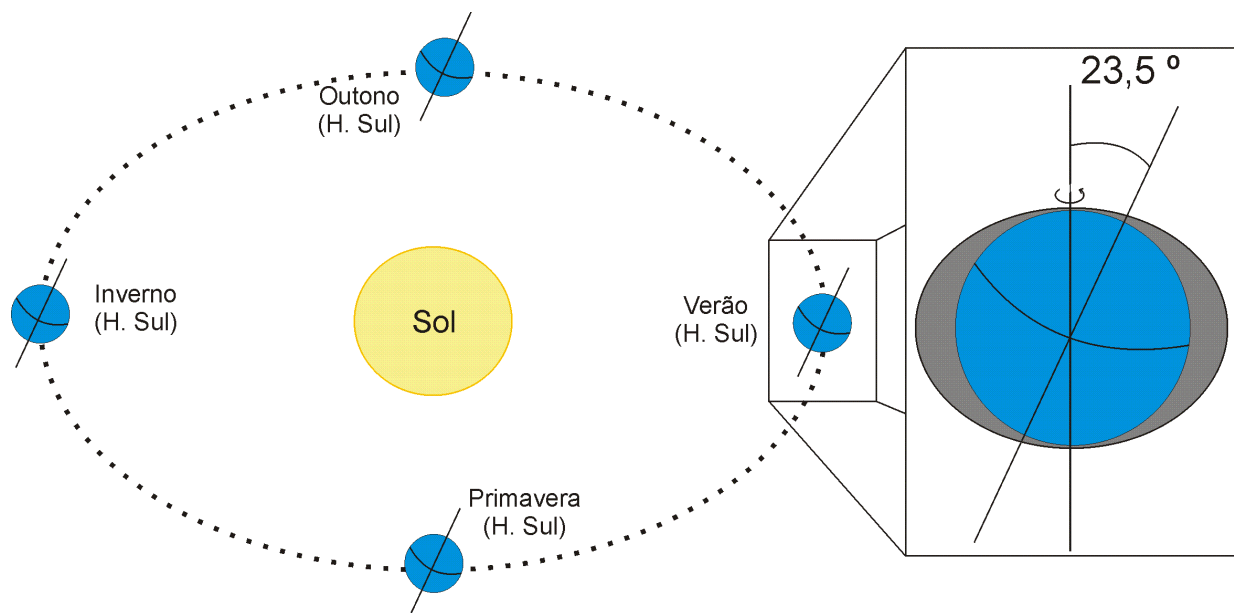
**Figura 8** Influência do Sol nas marés. Quando o sistema está alinhado, têm-se as marés de sizígia, do contrário, têm-se maré de quadratura. Modificado de Park (2008).

A Terra não se localiza no centro da órbita do sistema Terra-Lua, desta maneira, em alguns momentos a Lua passa mais próxima da Terra (357.000 km - perigeu) e, em outros, mais afastada (407.000 km - apogeu) (Figura 9). Apesar desta diferença de distância não ser muito grande, a variação da distância é observada nas marés, uma vez que essas são fortemente dependentes desta distância. A periodicidade desta variação é de 27,55 dias. Assim como no sistema Terra-Lua, o sistema Sol-Terra também apresentará variação similar, com período aproximado de um ano (Komar, 1976).



**Figura 9** Distâncias da Lua em relação à Terra durante o perigeu e o apogeu. Modificado de Komar, 1976.

A revolução ou translação é o movimento da Terra ao redor do Sol, durante este movimento, a Terra apresenta uma inclinação de  $23,5^\circ$  (Figura 10). Este movimento ocorre em um período de aproximadamente um ano. Além deste, outro movimento, conhecido como Nutação, completa um ciclo em 18,6 anos. Neste, o ângulo de inclinação do eixo da Terra em relação ao plano de órbita ao redor do Sol é variado em até  $5^\circ$  (Komar, 1976). Estes movimentos influenciam significativamente as marés e podem ser descritos e previstos através dos diferentes constituintes de maré.



**Figura 10** Inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de órbita ao redor do Sol. Modificado de Komar, 1976.

Os movimentos relativos entre Lua, Terra e Sol são bem descritos na literatura. Estes movimentos influenciam as marés em diferentes escalas de tempo. Komar (1976) apresentou resumidamente os principais componentes de maré (Tabela 1), destacando os diferentes períodos de cada componente. Dependendo da combinação das componentes, as marés astronômicas serão mais altas ou mais baixas. Em se tratando de eventos extremos, tornam-se importantes os momentos em que são combinadas as marés de sizígia, com a Lua em perigeu simultaneamente ao alinhamento da Terra e Sol. A esta combinação dá-se o nome de maré de sizígia de perigeu. Este fenômeno pode aumentar cerca de 40% da variação total de maré, afetando significativamente os níveis do mar (Komar, 1976).

**Tabela 1 Principais componentes de maré. Modificado de Komar (1976).**

	Símbolo	Período (horas solares)	Descrição
Semidiurnas (duas marés ao dia)	M <sub>2</sub>	12,42	Lunar semidiurno principal
	S <sub>2</sub>	12,00	Solar semidiurno principal
	N <sub>2</sub>	12,66	Função da variação da distância da Lua
	K <sub>2</sub>	11,97	Solar-lunar em função da declinação do Sol e da Lua durante o ciclo orbital
Diurnas (uma maré ao dia)	K <sub>1</sub>	23,93	Solar-lunar
	O <sub>1</sub>	25,82	Lunar diurna principal
	P <sub>1</sub>	24,07	Solar diurna principal
Longo período	M <sub>f</sub>	327,86	Quinzenal lunar

## 2.2. Maré Meteorológica

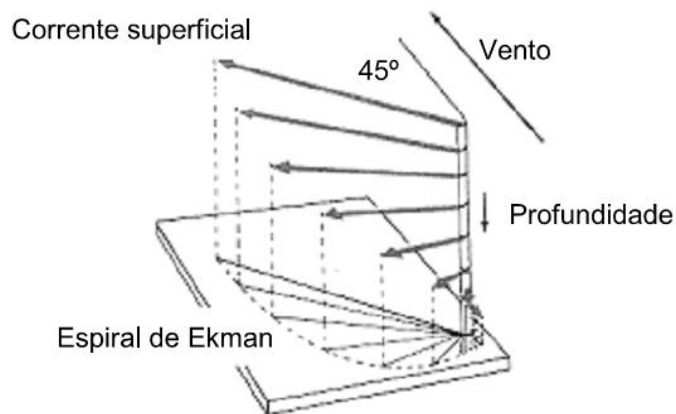
Maré meteorológica é a diferença entre o nível previsto e o medido para um determinado local. Essas diferenças podem ser causadas principalmente por mudanças de pressão atmosférica e ventos (Parker, 2005).

Diferenças de pressão atmosférica fazem com que os níveis dos oceanos aumentem (diminuição de pressão) ou diminuam (aumento de pressão). De acordo com Gornitz (2005), uma diminuição de 1 mb na pressão atmosférica produz um aumento aproximado do nível do mar de 1 cm. Esta variação é conhecida como efeito do barômetro invertido. Trucollo, (1998) encontrou o valor de -0,14 cm para a região de São Francisco do Sul, localizada a 40 km da Enseada do Itapocorói e a 300 km da praia de Morro dos Conventos. A autora aponta a atuação sobreposta de algum outro fenômeno na região de estudo como possível causa da não identificação do fenômeno.

Os ventos transferem energia da atmosfera para o oceano, gerando ondas e correntes que empilham ou afastam a água da costa. No hemisfério Sul, devido à rotação da Terra, os fluidos têm sua trajetória influenciada pelo efeito da Força de Coriolis (Figura 11), que atua perpendicularmente à direção do movimento no sentido anti-horário. Este transporte tem como direção líquida resultante 90° (no sentido anti-horário para o hemisfério Sul) da direção



do vento. Sendo assim, para uma costa de orientação S-N, localizada no hemisfério Sul, o vento proveniente de Sul gera uma elevação do nível d'água causada pelo "empilhamento" de água na costa, resultado do transporte de Ekman. Por outro lado, se o vento é proveniente do quadrante Norte, o oposto ocorre. As águas superficiais são forçadas em direção ao oceano e sua reposição é dificultada, diminuindo o nível d'água local.



**Figura 11** Representação vetorial das variações de velocidade e direção do movimento da água no hemisfério Sul com o aumento da profundidade. Fonte: Nunes (2007).

Na região Sul, a orientação da plataforma continental (Sudoeste-Nordeste) coincide com os ventos predominantes. Caracteristicamente, há uma grande pista para a atuação do vento sobre a superfície oceânica e o efeito de Coriolis torna-se bastante significativo neste processo. Os ventos do quadrante Sul associados à frente fria, induzirão a uma corrente com uma componente paralela à costa e a Força de Coriolis atuará no sentido de provocar um desvio no movimento do fluido para a esquerda. A Força de Coriolis exige um gradiente de pressão hidrostática que a contrabalance, causando um aumento da elevação do nível provocado pela corrente perpendicular ao vento (Gill, 1982, *apud* Truccolo, 1998). Neste caso, os eventos de subida do nível provocados pelo Mecanismo de Ekman, principalmente quando coincidente com marés de sizígias, podem provocar eventos extremos de maré meteorológica (Truccolo, 1998).

### 2.3. Nível Médio do Mar

Atualmente muito se discute sobre as variações do nível médio do mar de médio e longo prazo. Esse fenômeno é induzido, principalmente, pelo aquecimento global que aumenta a temperatura dos oceanos e, conseqüentemente, seu volume e pelo derretimento das massas de gelo que estão sobre os continentes.

Dentre os trabalhos que fizeram algum tipo de projeção para os próximos anos, o IPCC (2007) é o mais citado na bibliografia especializada. A taxa de elevação do mar deve aumentar (Figura 12) e sua média global no próximo século será entre 0,18 m e 0,59 m acima do nível atual. Além dessas previsões, dados gerados a partir de modelos matemáticos também vêm sendo utilizados. Como exemplo, têm-se os dados gerados pelo IH Cantábria (Zorrilla, 2011) que, para a região da desembocadura do Rio Negro na Argentina, chegou a um valor aproximado de 0,14 m de subida do nível médio até 2100.

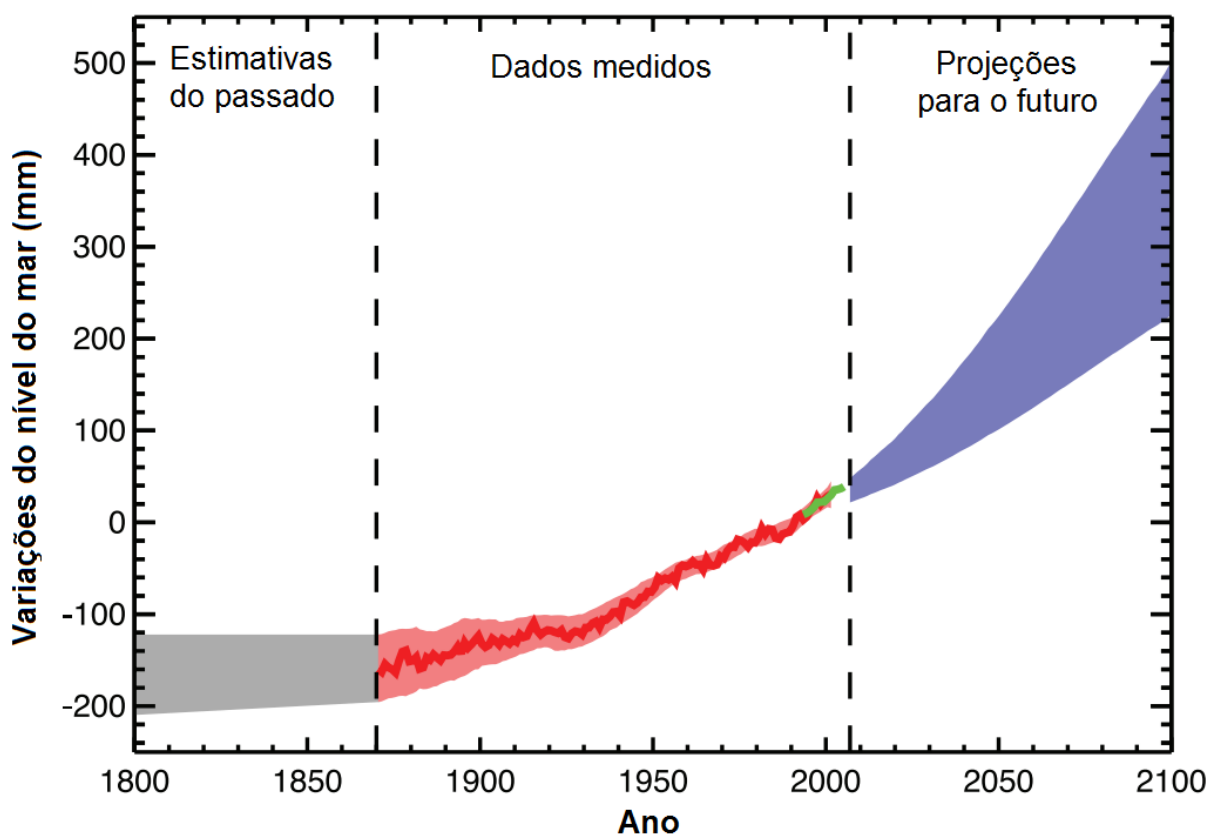
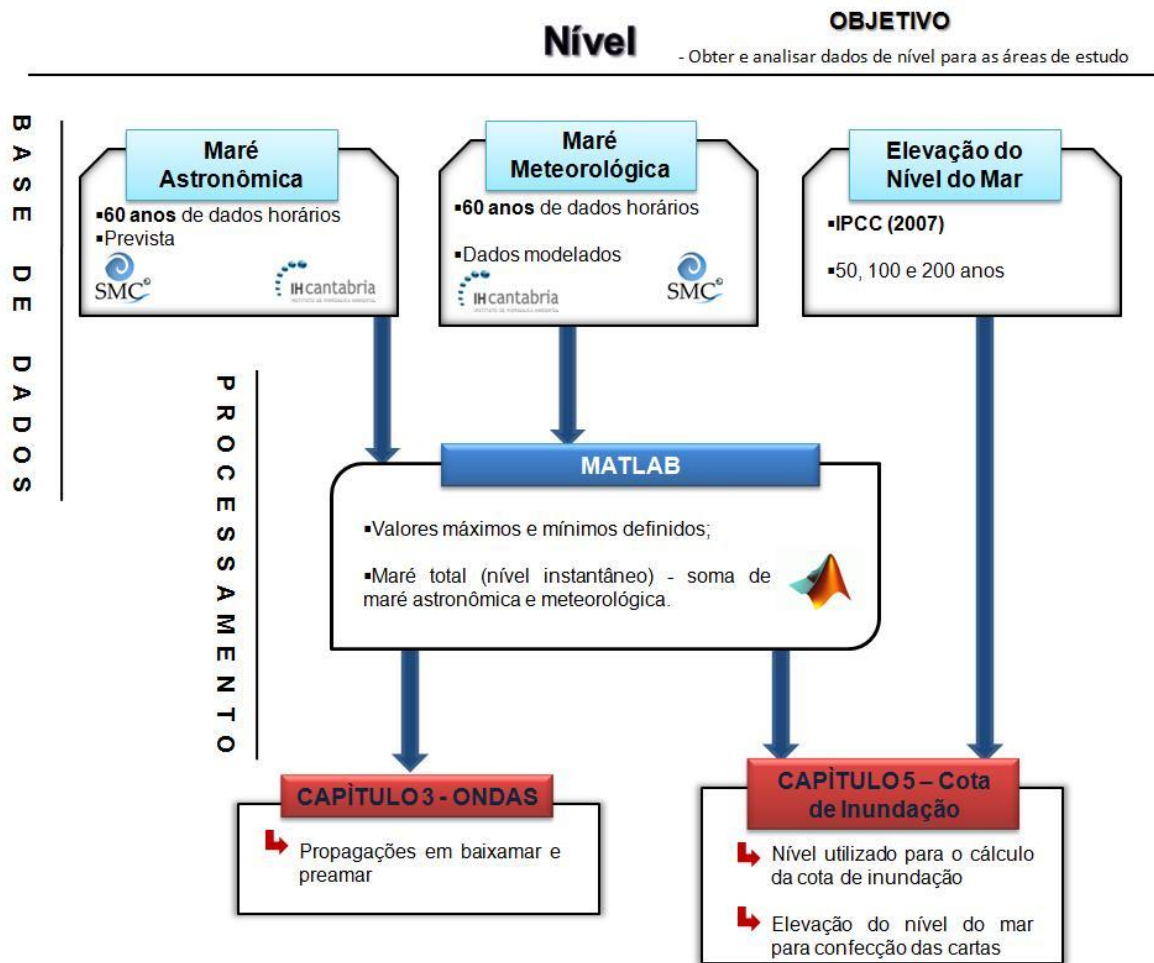


Figura 12 Variações do nível médio do mar. Em cinza as estimativas do passado, em vermelho e verde os dados medidos e em azul as projeções até 2100. Fonte: IPCC, 2007.

## 2.4 Metodologia

A metodologia para obter e analisar dados de nível para as áreas de estudo está resumida na Figura 13. Esta consistiu basicamente em adquirir os dados de: maré astronômica, maré meteorológica e elevação do nível do mar a médio e longo prazos e analisar as máximas e mínimas amplitudes da maré astronômica para utilizar no modelo matemático para a propagação das ondas (será descrito no capítulo 3). Também definiu-se o nível instantâneo para cada hora da série de dados disponível entre 1948 e 2008, e, finalmente, obteve-se o valor a ser utilizado como referência para elevação do nível do mar.



**Figura 13 Metodologia adotada para atingir o objetivo proposto neste capítulo.**

### 2.4.1. Marés

Os dados de maré foram disponibilizados pelo IH Cantábria e consistem em dados de reanálise de marés astronômica (denominada GOT) e meteorológica (denominada GOS). A resolução espacial dos dados é de  $0,25^\circ$  e temporal horária para o período entre 1948 e 2008. As séries de maré utilizadas neste trabalho estão referenciadas ao nível médio das mesmas entre 1948 e 2008.

#### 2.4.1.1. Maré Astronômica

A maré astronômica foi gerada utilizando-se das constantes harmônicas ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$  e  $Q_1$ ) do modelo global de marés TPXO (versão 7-<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>) desenvolvido pela Universidade do Estado de Oregon (Egbert et al., 1994; Egbert e Erofeeva, 2002). A partir desses dados, foi feita uma reanálise pelo IH Cantábria com resolução espacial de  $0,25^\circ$  e temporal horária no período entre 1948 e 2008 (Luca, 2011).

#### 2.4.1.2. Maré Meteorológica

Para maré meteorológica, foram obtidos dados provenientes de cálculos do modelo tridimensional de circulação oceânica (*ROMS - Regional Ocean Modeling System*) desenvolvido por *Ocean Modelling Group de Rutgers* que foi aplicado e disponibilizado pelo IH Cantábria. As forçantes utilizadas neste modelo foram as mesmas utilizadas para gerar os dados de onda descritos no capítulo 3. O modelo ROMS resolve as equações conhecidas como primitivas onde se assume que a pressão segue uma lei hidrostática. As equações englobam as seguintes premissas: da conservação da quantidade de movimento, da conservação de massa, de transporte de diferentes substâncias como temperatura e salinidade e, por último, do cálculo da densidade da água (Luca, 2011).

As forçantes utilizadas no modelo ROMS foram ventos a 10 m de altura e pressão ao nível do mar (SPL), com resolução temporal de 6 horas e espacial de  $1,9041^\circ \times 1,875^\circ$ , provenientes do Centro NCEP/NCAR dos Estados Unidos. Esses dados cobrem, completa e homoganeamente, o período entre 1948 e 2008 (Luca, 2011).

#### 2.4.2. Elevação do nível do mar

Os dados de elevação de longo prazo do nível do mar considerados para este trabalho são baseados nas projeções sugeridas pelo IPCC (2007), que estão entre 0,18 m e 0,59 m até 2100. Como se pretende analisar cenários de inundação por eventos extremos, foram consideradas as previsões mais pessimistas, sendo esta elevação de aproximadamente 0,63 cm/ano. Em 50 anos chega-se a um valor de 0,315 m, para 100 anos o valor de 0,63 m e para 200 anos o valor de 1,26 m.

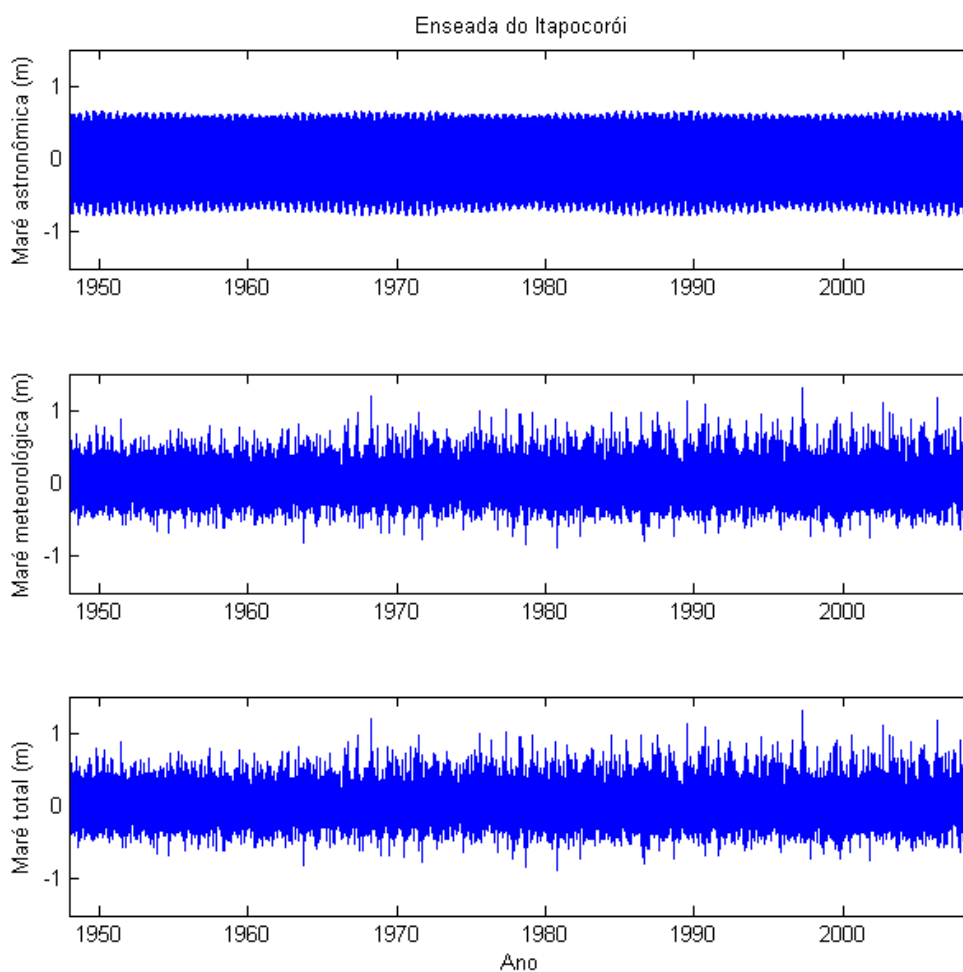
#### 2.4.3. Processamento

Os dados de maré astronômica foram analisados e definidos os valores extremos, a partir dos quais foi possível analisar a variação máxima entre a maré mais baixa e a mais alta observadas para a Enseada do Itapocorói e praia do Morro dos Conventos: de 1,43 m e 0,85 m respectivamente. Estes valores foram utilizados para as propagações de preamar. Para baixamar foi utilizado o valor zero, uma vez que a base de dados batimétrica foi reduzida a este nível de referência, conforme adotado pela Marinha do Brasil na confecção das cartas náuticas. O nível total de maré utilizado foi dado pela soma da maré astronômica com a meteorológica para cada hora (intervalo entre os dados) entre fevereiro de 1948 e dezembro de 2008 (Figura 14 e Figura 15). Este dado foi utilizado para o cálculo da cota de inundação (Capítulo 5).

## 2.5 Resultados

### 2.5.1 Enseada do Itapocorói

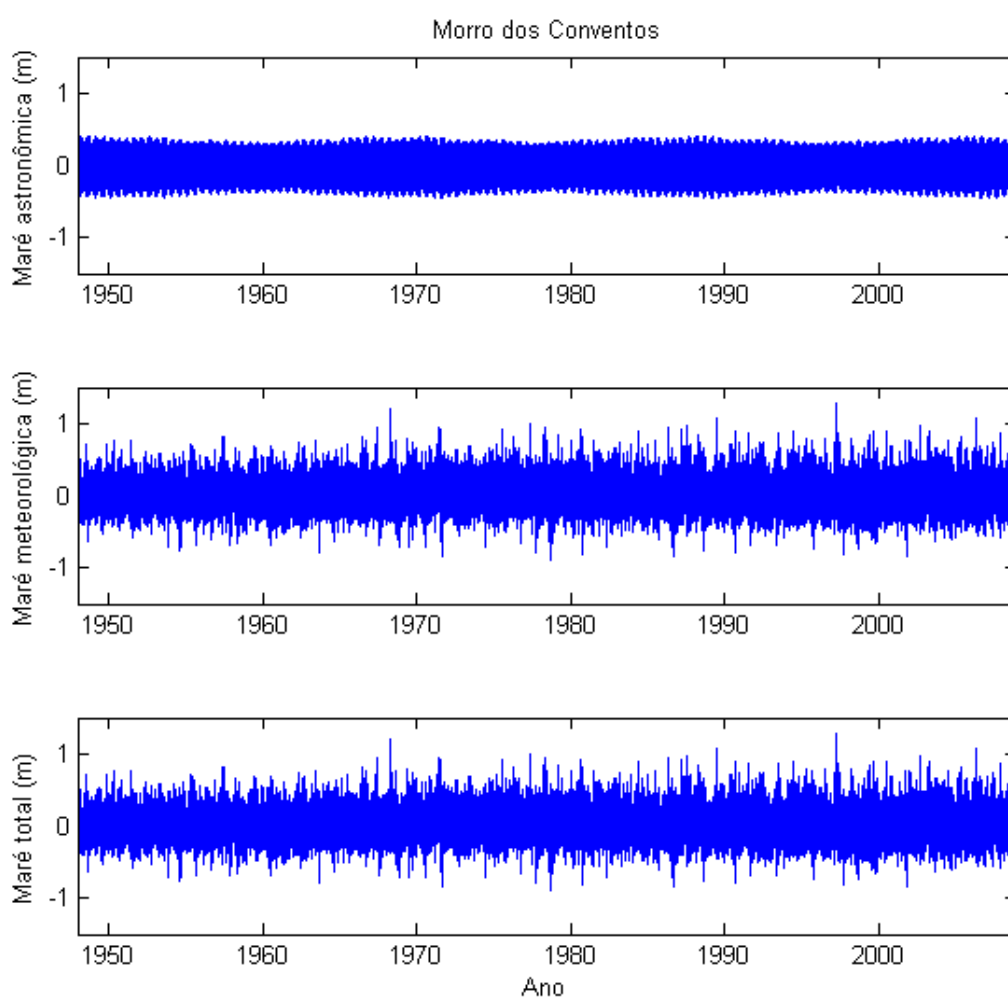
Na Enseada do Itapocorói as marés apresentaram o valor mínimo de maré astronômica de -0,77 m e o máximo de 0,66 m em relação a média, sendo o total 1,43 m. Este valor está próximo ao valor descrito por Carvalho et. al. (1996 *apud* Ramires, 2010) de 1,2 m para a desembocadura do Rio Itajaí-açu, cerca de 20 km ao Sul da área de estudo. Os valores de marés meteorológicas, como esperado para uma região de micro-marés, foram superiores, sendo o mínimo de -0,88 m e máximo de 1,31 m em relação à média, totalizando 2,19 m. Trucolo (1998) analisou dados de São Francisco do Sul, cerca de 50 km ao Norte da Enseada do Itapocorói e encontrou uma variação máxima de 2,51 m. Para o cálculo da cota de inundação (Capítulo 5) foi utilizada a maré total, que é dada pela soma dos valores de maré astronômica e meteorológica (Figura 14).



**Figura 14** Série de maré para Enseada do Itapocorói. No topo as amplitudes da maré astronômica, no centro às da maré meteorológica e abaixo a amplitude da maré (soma das marés meteorológica e astronômica).

### 2.5.2 Morro dos Conventos

Para a praia Morro dos Conventos, os valores de nível encontrados foram os mais baixos entre as áreas de estudo. Apresentaram um mínimo de -0,45 m e máximo de 0,40 m, totalizando uma amplitude de 0,85 m. Este valor é similar ao descrito por INPH (1993) para o Rio Araranguá de 0,90 m. O valor mínimo para a maré meteorológica foi de -0,89 m e máximo de 1,27 m, totalizando 2,16 m. Somando-se ambas as séries, astronômica e meteorológica, obteve-se o valor mínimo de -1,16 m e máximo de 1,41 m, totalizando 2,57 m (Figura 15).



**Figura 15** Série de maré para Morro dos Conventos. No topo as amplitudes da maré astronômica, no centro, as da maré meteorológica e abaixo maré total (soma das marés astronômica e meteorológica).

### 2.6 Conclusão

Os valores obtidos através dos dados de reanálise foram similares aos encontrados na literatura. Contudo, os dados de Truccollo (1998) foram obtidos 50 km ao Norte da Enseada

do Itapocorói, o que explica os maiores valores totais de maré encontrados pela autora. Para a praia de Morro dos Conventos, os valores também foram similares aos encontrados na literatura, contudo estes foram obtidos na região interna do Rio Araranguá, o que pode explicar a diferença de 5 cm encontrada entre os dados. Além disso, os dados utilizados pelo presente trabalho estão referenciados à média de marés para os 60 anos de dados, o que pode gerar diferenças entre estes e os valores reais.

Para a análise dos eventos extremos é importante considerar as marés astronômicas e meteorológicas de forma conjunta. Truccolo (1998) indica que valores de nível excepcional podem ser alcançados com a sobreposição de valores relativamente baixos de maré meteorológica em períodos de sizígia. Se, somado ao período de sizígia a Lua estiver próxima da Terra (perigeu) este fenômeno pode ser ainda maior.

A análise dos 60 anos de dados para ambas as áreas possibilitou a definição de níveis considerados de preamar e baixamar para a propagação das ondas em ambas as condições. Os níveis instantâneos (maré total) serão utilizados no cálculo da cota de inundação (Capítulo 5) somados aos efeitos do *wave run-up* (Capítulo 4).

## CAPÍTULO 3 – Ondas

---

Para o cálculo da cota de inundação em zonas costeiras é fundamental ter conhecimento do comportamento do *wave run-up* na praia de interesse. Este é função dos parâmetros de onda. Entretanto, os dados disponibilizados pelo IH Cantábria estão localizados em águas profundas. Em face disso, viu-se a importância da propagação dos parâmetros ondulatórios, através de modelo matemático, para locais próximos à área de interesse. Dessa maneira, o *wave run-up* foi calculado (Capítulo 4) a partir de dados mais realistas.

### 3.1. SWAN

O modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) é um modelo de terceira geração que resolve a equação do balanço de energia, o qual representa os efeitos da propagação espacial, refração, empinamento, geração, dissipação e interações não lineares onda-onda (THE SWAN TEAM, 2009). Possui filosofia idêntica ao do modelo WAM (*Wave Prediction Model*) de terceiro ciclo. A principal diferença entre esses dois modelos é que o modelo WAM considera apenas escala oceânica, enquanto as propagações de onda no modelo SWAN são calculadas desde águas profundas até a zona de surfe. Como o WAM utiliza esquemas explícitos de propagação no espaço geográfico e espectral, ele necessita malhas computacionais bem reduzidas em águas rasas, tornando-o inutilizável para regiões costeiras (THE SWAN TEAM, 2009). Desta maneira, o modelo SWAN se apresenta como uma excelente opção para o presente trabalho.

### 3.2. Dados utilizados

O modelo SWAN necessita como dados de entrada: batimetria de detalhe em águas rasas, parâmetros de onda (altura significativa período de pico e direção média) e nível de maré para cada caso de onda. Para trabalhos de modelagem numérica, a qualidade dos dados de entrada é de fundamental importância. Neste trabalho, os dados de ondas e marés (descritos no capítulo 2) foram cedidos pela Universidade de Cantábria, via projeto SMC/Brasil. Os dados de batimetria de detalhe e de topografia para a praia de Morro dos Conventos foram obtidos nas empresas Engenharia e Gerenciamento de Recursos Ambientais (ENGERA) e Coastal Planning & Engineering do Brasil (CPE). Para a Enseada do Itapocorói, foram utilizados dados obtidos através do projeto de pesquisa Edital 44/2008 CNPq CTTTransArea "*Análise do Balanço de Sedimentos Arenosos em Bacias Hidrográficas Costeiras como técnica de Controle de Zonas de Erosão Acentuada*".



### 3.2.1 Ondas

Os dados de onda consistem em uma base horária de altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção (Dir) para o mesmo período dos dados de maré descritos no capítulo 2 (1948 a 2008). Esses dados foram gerados através de uma reanálise denominada *Global Ocean Waves* (GOW) desenvolvida no IH Cantábria, utilizando-se do modelo WAVEWACH III (Tolman 1997, 1999). Para essa reanálise foi utilizada uma base de dados de circulação atmosférica global (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis>) da NOAA. Os dados da reanálise GOW (Global Ocean Waves) se estruturam partindo de uma escala global (1,5° de longitude por 1° de latitude -Figura 16a) para uma escala regional (de 0,5° por 0,5° - Figura 16b).

O modelo WAVEWACH III é um modelo de terceira geração evoluído do WAVEWACH I, que foi desenvolvido na Delft University of Technology (Tolman, 1989), e do WAVEWACH II, desenvolvido pela NASA, Goddard Space Flight Center (Tolman 1992) com base na equação da conservação da densidade espectral, sendo as propriedades do meio (correntes e batimetria) e as propriedades do campo de onda, que variam no espaço e tempo em escalas muito maiores que o comprimento de onda.

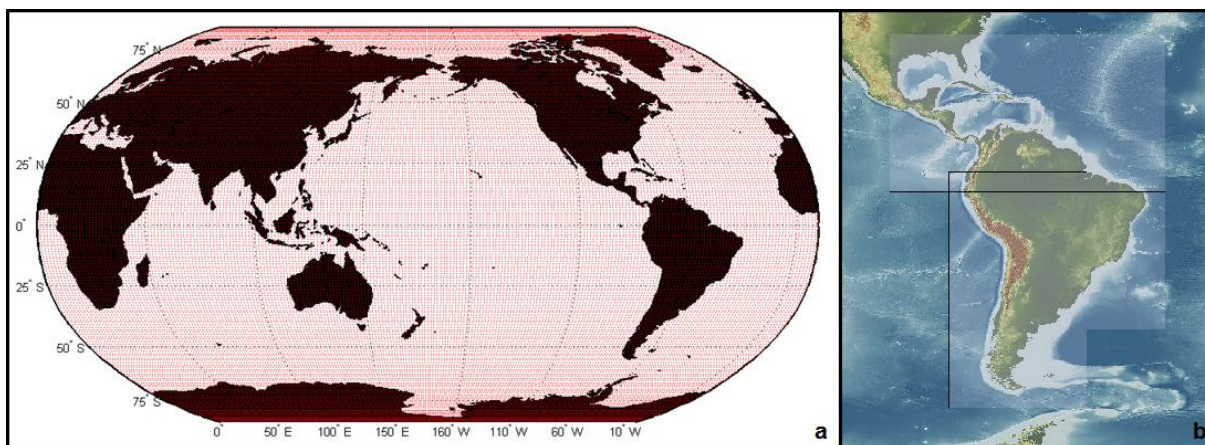


Figura 16 a) Malha global de reanálise GOW e b) malha de reanálise GPW do litoral brasileiro. (Fonte: de Luca, 2011).

Para a seleção dos dados globais foram escolhidos dois pontos ao longo da costa de acordo com a proximidade das áreas de estudo, a praia de Morro dos Conventos (48,5°O e 30°S) e a Enseada do Itapocorói (47°O, 27°S) de acordo com a Figura 17. Os dados utilizados neste estudo fazem parte de uma análise prévia realizada pelo IH Cantábria sobre os impactos ocasionados pelas mudanças climáticas na costa da America Latina e Caribe (CEPAL).

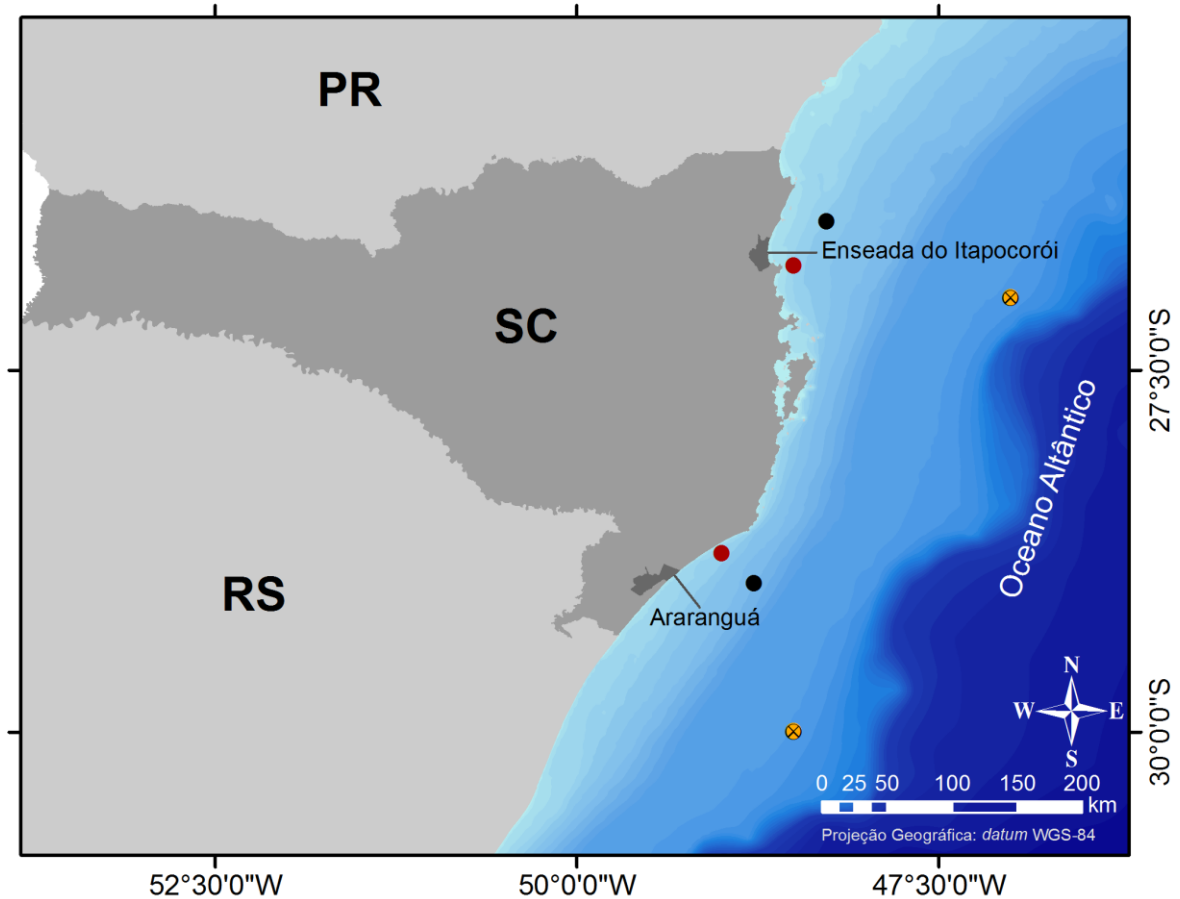


Figura 17 Localização dos dados de entrada utilizados nos modelos matemáticos. Em vermelho, os locais de aquisição de dados de maré meteorológica, em preto de maré astronômica e em laranja de dados de onda.

### 3.2.1 Batimetria

A batimetria foi composta por dados gerais (para as águas profundas) e de detalhe (mais próximo à área de estudo). Sendo os dados gerais extraídos de cartas náuticas da Marinha do Brasil e os dados de detalhe obtidos através de levantamentos hidrográficos específicos para cada área. Em função da diferença de *data* vertical (DHN e IBGE), para as propagações dos parâmetros ondulatórios em baixamar, os *data* dos levantamentos hidrográficos de detalhe foram reduzidos ao mesmo nível das cartas náuticas, subtraindo-se de todos os valores do levantamento metade da máxima variação de maré para cada local (0,715 m para Enseada do Itapocorói e 0,425 m para Morro dos Conventos). Em preamar, foi utilizado o nível correspondente à máxima variação de maré (1,43 m para Enseada do Itapocorói e 0,85 m para Morro dos Conventos).

### 3.2.1.1 Batimetria Geral

A batimetria geral utilizada consistiu da digitalização de 10 cartas náuticas, sendo dessas 9 em formato *.kap* produzidas e disponibilizadas pelo Centro de Hidrografia da Marinha - CHM, (nº 30, 90, 1902, 1910, 1911, 2000, 21070, 23300 e 23400 disponíveis em: [https://www.mar.mil.br/dhn/chm/cartas/download/cartasbsb/cartas\\_eletronicas\\_Internet.htm](https://www.mar.mil.br/dhn/chm/cartas/download/cartasbsb/cartas_eletronicas_Internet.htm)) e uma carta náutica impressa (1809), que foi digitalizada, georreferenciada e, posteriormente, recebeu o mesmo processo de edição das cartas disponíveis em formato *.kap*. No software ArcGIS® 9.3, as cartas foram digitalizadas, vetorizadas e transformadas em arquivos *shape (.shp)* contendo informações de longitude, latitude e profundidade (x, y, z). As cartas da Marinha do Brasil estão referenciadas ao nível de referência utilizado pela Marinha, que corresponde, normalmente, à média das baixamares de sizígia.

### 3.2.1.2 Batimetria de Detalhe - Enseada do Itapocorói

O levantamento batimétrico de detalhe foi realizado entre os dias 2 e 6 de novembro de 2011 e consistiu do acoplamento de uma sonda Garmin GPSMAP 178c de precisão sub-métrica para aquisição dos dados de profundidade, da utilização de um GPS-RTK Trimble R6 (de precisão centimétrica) para o posicionamento e correção de maré, e de um *netbook* com o *software* HYPACK® para navegação, captação e sincronização dos dados. Os dados obtidos estão referenciados ao *datum* vertical do IBGE PA-01, localizado na cidade de Piçarras.

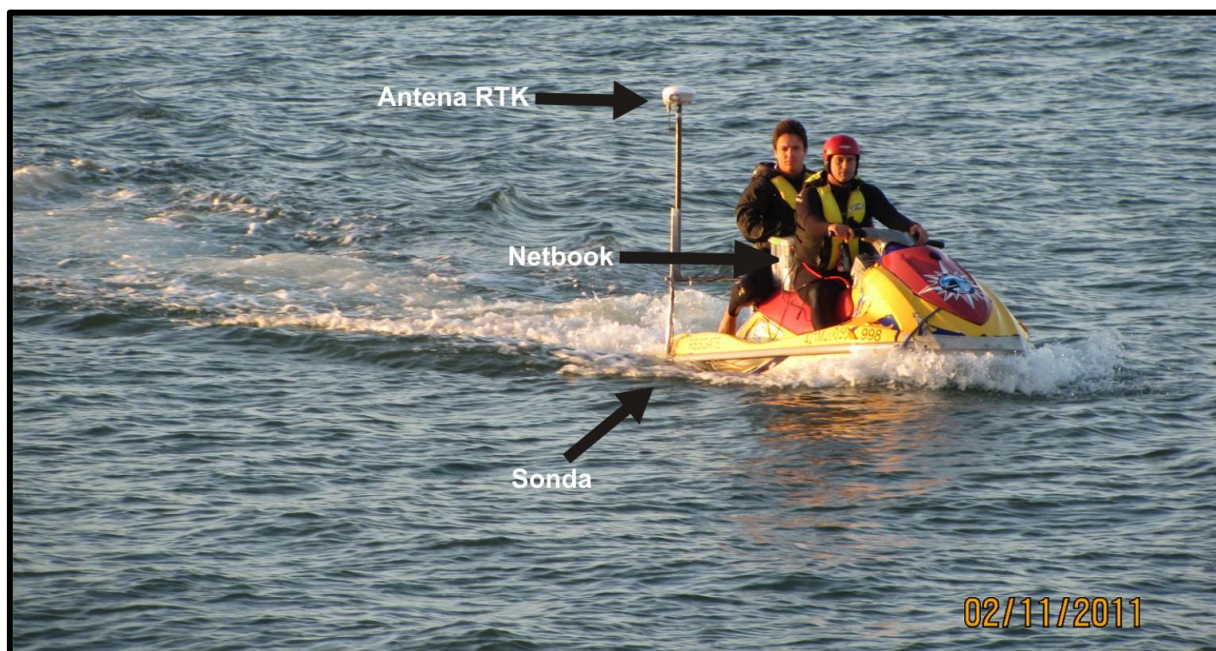


Figura 18 Esquema utilizado para o levantamento batimétrico de detalhe. Destaca-se a posição da antena do GPS-RTK, da sonda e do netbook utilizados no trabalho de campo. Foto: Diego Bitencourt.

### 3.2.1.3 Batimetria de Detalhe - Morro dos Conventos

A batimetria para esta área foi cedida pelas empresas ENGERA E CPE. Esta consistiu de um levantamento hidrográfico com a metodologia composta do acoplamento de uma sonda batimétrica e de um sistema de posicionamento sub-métrico GPS em uma moto aquática (*jet ski*- Figura 19) similar à desenvolvida na Enseada do Itapocorói.

As linhas de navegação foram planejadas e executadas através do software de navegação Hypack 2008, sendo os dados reduzidos para o RN IBGE localizado na comunidade de Ilhas (N 6801111,745 e E 662982,254) com altitude 1,749 m (*datum* SAD-1969 MC 51°). Esta metodologia possibilita amostragens em áreas extremamente rasas (> 50 cm de coluna d'água), como bancos arenosos associados às barras, deltas de maré vazante e enchente e áreas de quebra de onda (ENGERA, 2009).



Figura 19 Moto aquática (*jet ski*) utilizada nos levantamentos batimétricos de detalhe ao largo da praia de Morro dos Conventos. É possível observar a haste de suporte do transdutor e a antena de transmissão de dados. (fonte: CPE, 2009).

### 3.3. Metodologia

A metodologia utilizada para essa parte do trabalho está resumida na Figura 20.

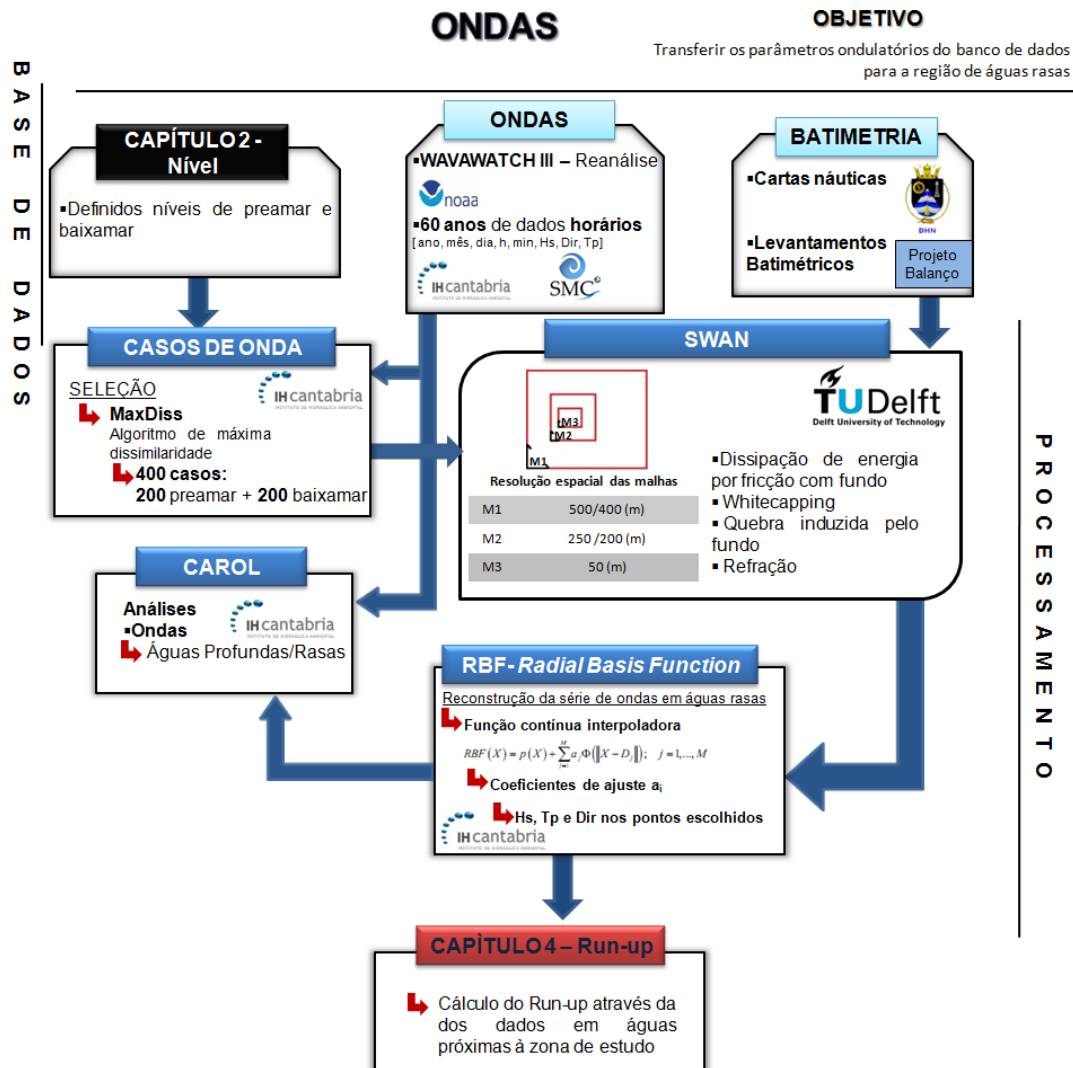


Figura 20 Resumo da metodologia de transferência de ondas para a região costeira.

### 3.3.1. Seleção dos Casos (*MaxDiss*)

Em virtude da grande quantidade de dados (534.000), torna-se inviável a propagação de toda a série de onda no modelo SWAN. Por este motivo, foram selecionados casos representativos que possibilitassem a reconstrução da série completa em águas rasas ao final da propagação. Esta seleção foi feita em ambiente MATLAB através da Metodologia de Máxima Dissimilaridade (*MaxDiss*) proposta por Camus (2011).

O método *MaxDiss* foi descrito por Kennard e Stone (1969 *apud* Camus, 2011) e é bastante utilizado em estudos de grandes bases de dados químicos e possui variações em função da definição do vetor mais dissimilar (Willet, 1996). Consiste em uma interação cíclica até que se atinja o número de amostras escolhido.

O algoritmo normaliza as variáveis ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $Dir$ ) para que todas tenham o mesmo peso. Em seguida, encontra o vetor de maior dissimilaridade entre a série e o transfere para uma subamostra. Sucessivamente é buscado o dado de maior dissimilaridade em relação à subamostra até que se atinja o valor escolhido na configuração do algoritmo.

Camus et al. (2011), em um trabalho que testou a seleção de casos *MaxDiss* com um “n” de 25, 100 e 1000 casos, percebeu que quanto maior o “n” da subamostra, mais preciso é o dado. Além disso, a autora sugere que os erros relacionados à seleção de casos passam a ser praticamente nulos a partir dos 100 casos. Neste trabalho, foram selecionados 200 casos para cada área de estudo. Cada caso foi levado ao modelo SWAN e propagado em baixamar e preamar (definidos no Capítulo 2), totalizando 400 casos para cada área (Figura 21).

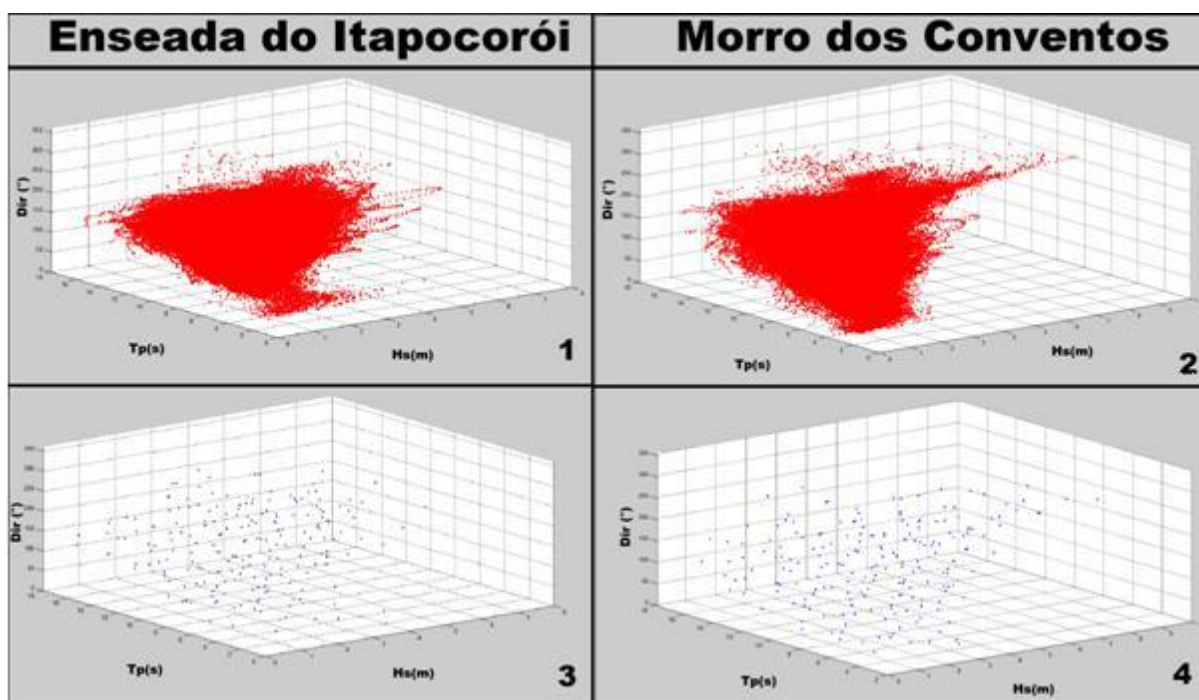


Figura 21 Casos selecionados a partir da metodologia *MaxDiss*. Em vermelho estão apresentadas as séries completas; em azul, a seleção feita a partir da metodologia *Maxdiss* (1 e 3- Enseada do Itapocorói, 2 e 4 - Morro dos Conventos).

### 3.3.2. SWAN

Para os cálculos foram utilizadas três malhas para cada uma das áreas de estudo (Tabela 2 / Figura 22), de maneira que a porção externa da primeira malha coincide com o ponto de onda disponibilizado pelo IH Cantábria. O modelo inicia com valores de onda iguais em toda a borda da malha e a propaga por todo o seu domínio. À medida que a onda se aproxima do raso e começa a interação com o fundo, as malhas vão refinando, aumentando o número de

nós de cálculo e diminuindo o espaçamento entre esses. Dessa maneira, há uma redução considerável no tempo de processamento computacional.

Tabela 2 Resolução das malhas de cálculo.

Área/Resolução	M1	M2	M3
Morro dos Conventos	400 m x 400 m	200 m x 200 m	50 m x 50 m
Enseada do Itapocorói	500 m x 500 m	250m x 250 m	50 m x 50 m

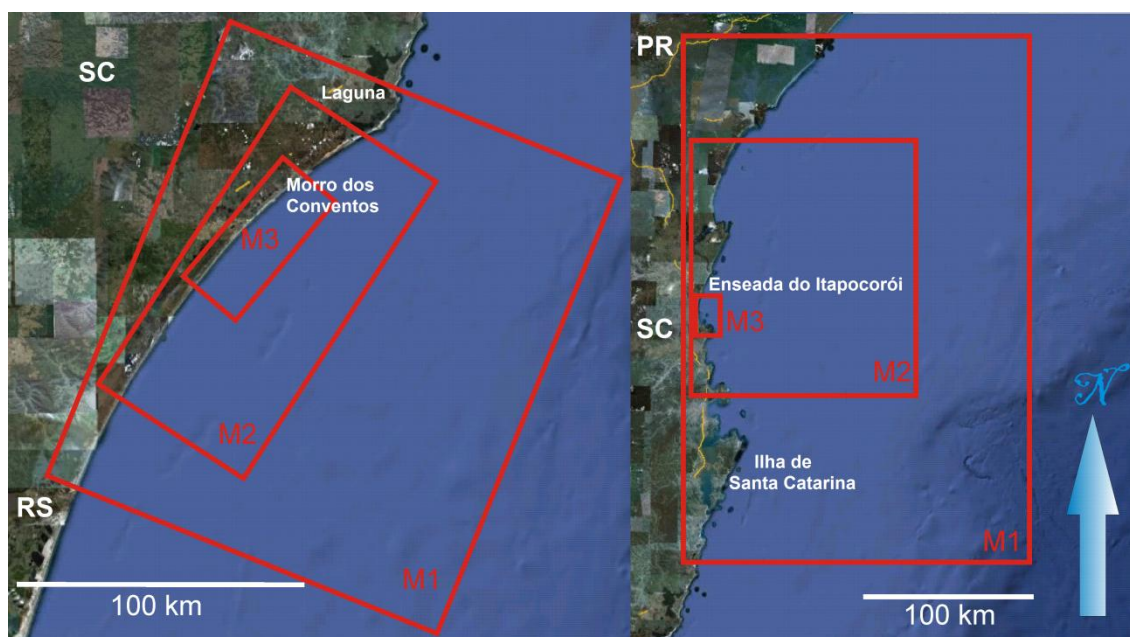


Figura 22 Malhas de cálculo utilizadas para propagação no modelo SWAN.

Foram obtidos os resultados para todos os nós da última malha em preamar e baixamar. Em cada uma das áreas foram selecionados pontos onde os parâmetros ondulatórios ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $Dir$ ) foram extraídos para a interpolação e reconstrução da série em águas mais próximas da costa. Para a Enseada do Itapocorói, adicionalmente, foi possível realizar um trabalho de campo para calibração e validação das fórmulas de *wave run-up*. Por esse motivo, a localização onde a série foi reconstruída coincidiu com o local onde foi fundeado o equipamento (Figura 23) para medição das ondas (será descrito no capítulo 4).

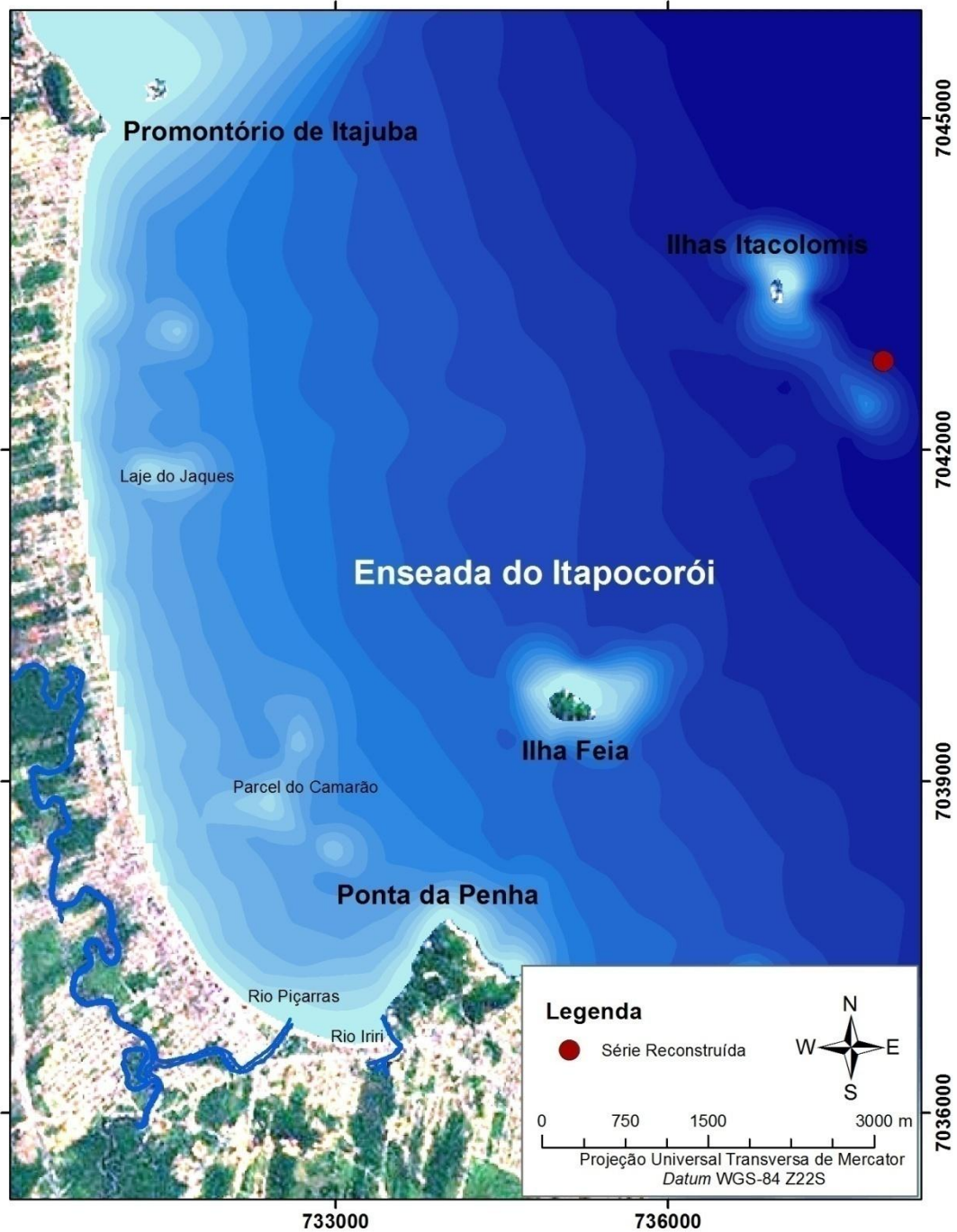


Figura 23 Local próximo à costa onde foi reconstruída a série de dados de onda, coincidindo com a posição de fundeio do equipamento (ADCP) utilizado para medir ondas.

Com o intuito de observar se há variação das características dos parâmetros ondulatórios ao longo da praia de Morro dos Conventos foram escolhidos 6 locais sobre a linha isobatimétrica de 15 m (Figura 24). Nesses locais os dados foram interpolados para a reconstrução da série original, gerando um dado a cada hora durante os 60 anos (1948-2008), totalizando 534.000 casos de altura significativa ( $H_s$ ) período de pico ( $T_p$ ) e direção de ondas.



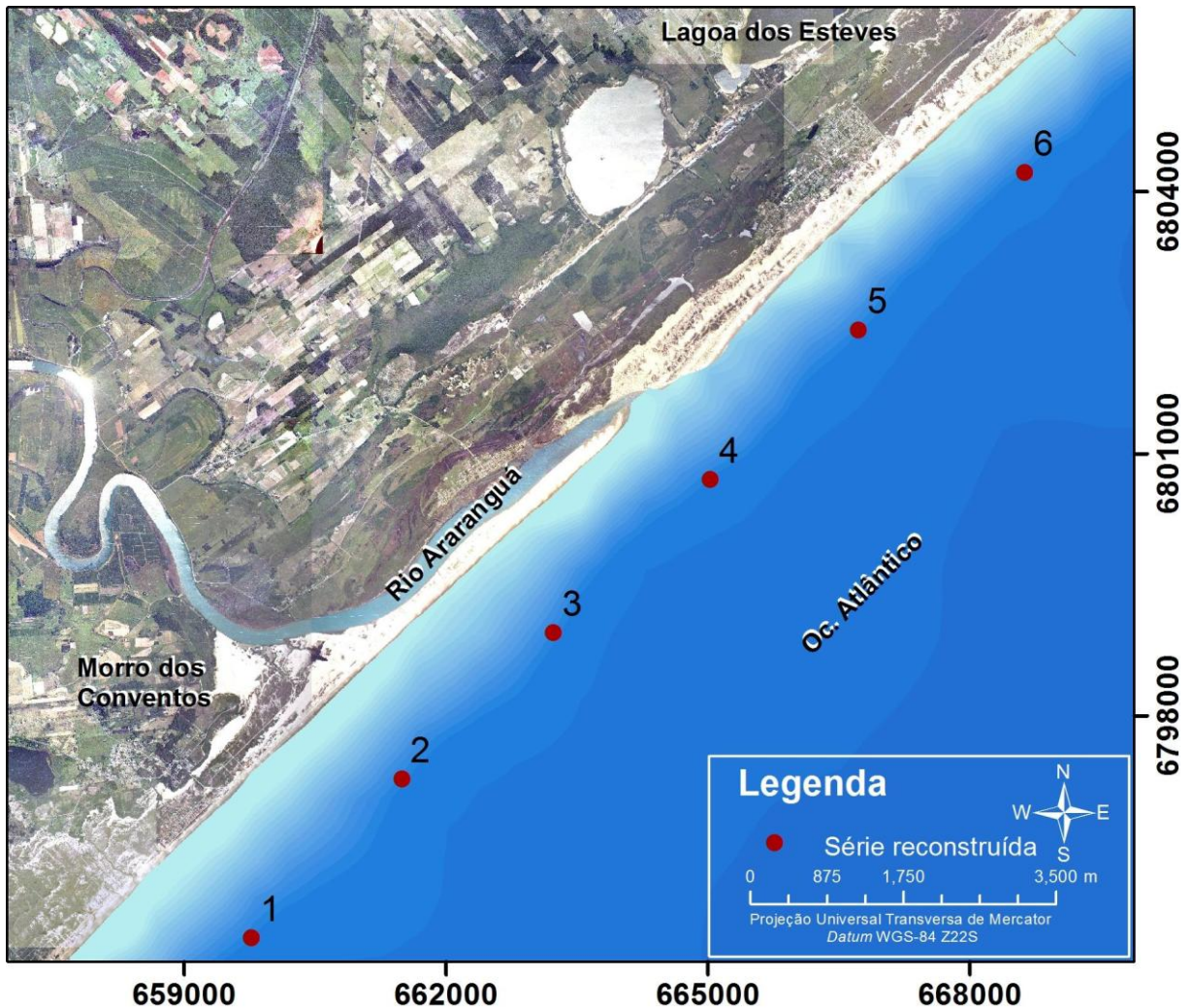


Figura 24 Localização dos pontos onde foram adquiridos os dados de onda gerados através das propagações com o modelo SWAN.

### 3.3.2 Reconstrução da Série - RBF

Propagados os 200 casos de ondas em preamar e em baixamar, torna-se necessária a reconstrução da série completa em águas rasas para análise de recorrência dos eventos extremos. Para isso foi utilizado o método de interpolação em função de base radial (RBF) descrito por Camus (2011). Este método, segundo Frenke (1982, *apud* Camus, 2011), é indicado para a interpolação de grande dimensão de dados distribuídos não uniformemente.

Essa técnica utiliza como função interpoladora uma combinação linear de funções radiais simétricas básicas nos pontos dados (Luca, 2011). A interpolação consiste em uma soma ponderada de funções de bases radiais simétricas localizadas nos pontos onde se têm dados. A função aproximada assumida tem a seguinte forma:

$$RBF(x) = p(x) + \sum_{j=1}^M a_j \phi(\|x - x_j\|)$$

onde:  $\phi$  é a função de base radial;  
 $\| \cdot \|$  a norma euclidiana de RBF;  
 $p(x)$  é um polinômio com todas as variáveis utilizadas;  
 $a_j$  e  $b$  são coeficientes de ajuste;  
 $x_j$  é o centro de interpolação.

Aplica-se a RBF aos dados nos pontos de interesse próximos à costa para os 200 casos em preamar e baixamar de ambas as áreas e se obtém a série reconstruída (60 anos de dados horários de  $H_s$ ,  $T_p$  e Dir). Posteriormente, os 200 casos são novamente interpolados em função da maré astronômica correspondente, obtendo-se assim uma nova série de dados de ondas propagadas com valores corrigidos de maré.

### 3.3.5 Caracterização dos regimes de ondas

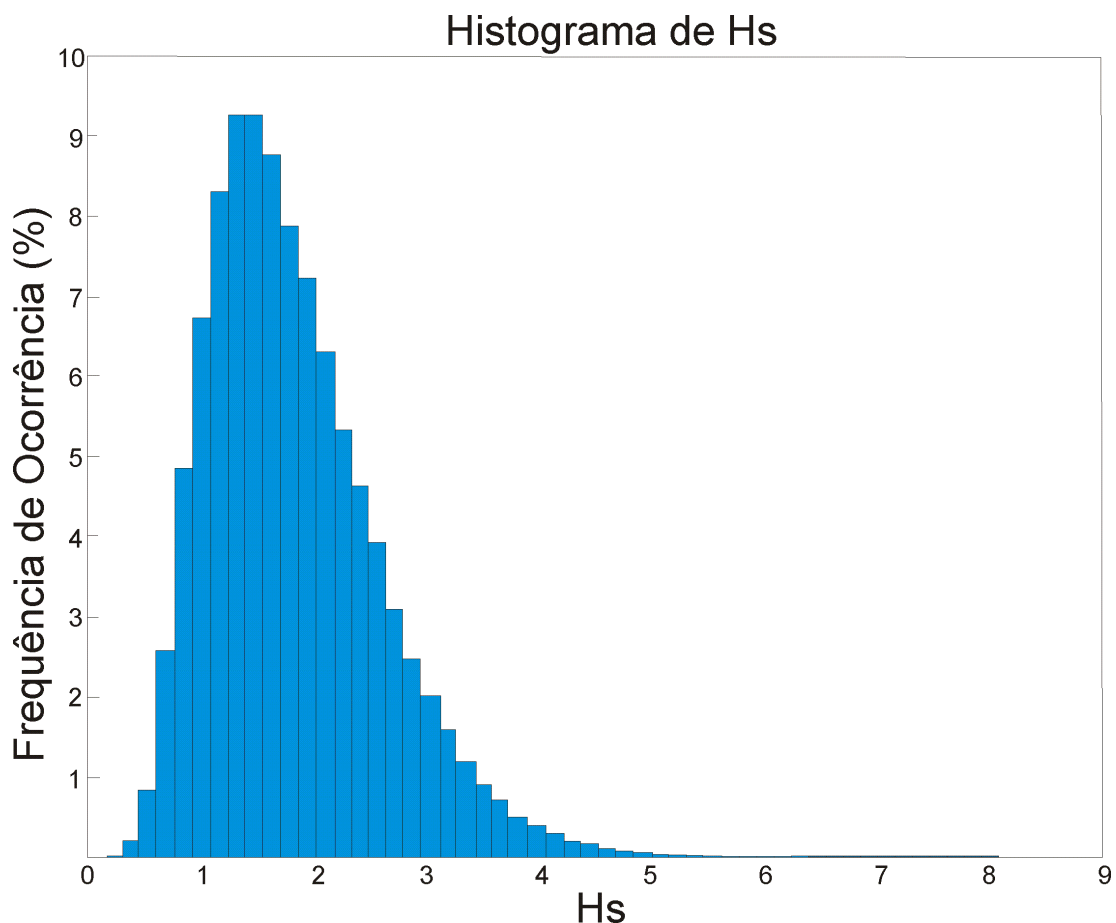
A caracterização do regime de ondas foi feita na ferramenta de análise estatística CAROL (*Caracterización de Regímenes de Oleaje*) desenvolvida pelo IH Cantábria. Esta é constituída por um pacote de rotinas de cálculo em MATLAB® e foi desenvolvida para a caracterização de variáveis oceanográficas definidas a partir de uma série temporal, sendo segmentada em três módulos: Descritores dos dados, Regime médio e Regime extremo. Para este trabalho foram utilizados o primeiro e o último módulo.

As séries de dados de águas profundas e reconstruídas próximas à costa (ver item 3.3.4 Reconstrução da Série - RBF), para ambas as áreas de estudo, foram levadas à ferramenta CAROL, onde foram construídos histogramas de  $H_s$  e rosa direcional de alturas significativas de onda por direção. Em posse dos resultados, fez-se a descrição e análise das modificações ocorridas nas características da série entre águas profundas e águas próximas à costa.

## 3.4. Resultados

### 3.4.1 Enseada do Itapocorói - águas profundas

A Figura 25 mostra a frequência de alturas significativas em águas profundas próximo à Enseada do Itapocorói (Figura 17). As ondas de maior ocorrência possuem altura entre 1,5 e 2 m de altura. Ocorrem raramente ondas maiores que 4 m, sendo a maior aquela de 8 m encontrada no período de 1948 a 2008. Este caso está relacionado à propagação na direção Sul-Sudeste, a qual sofre processos de refração e difração ao se propagar para a zona de estudo, reduzindo a altura de onda observada na costa.



**Figura 25** Histograma de altura significativa de onda em águas profundas próximo à Enseada do Itapocorói.

A rosa direcional apresentada na **Figura 26** mostra as propagações em águas profundas próximo à Enseada do Itapocorói. Observando a figura, nota-se a presença de ondas de Sul (20%) e de Leste (21%) com praticamente a mesma frequência. As maiores alturas (até 7,9 m) estão relacionadas às ondas do quadrante Sul, porém aquelas de Norte e Oeste também apresentam grandes alturas de até 5,3 m e 3,3 m, respectivamente. Contudo, estas se propagam em direção ao mar aberto, não chegando à área de estudo. De acordo com Signorin (2010), as ondas de Leste estão relacionadas aos períodos de primavera e verão, enquanto no outono e inverno as de Sul são predominantes.

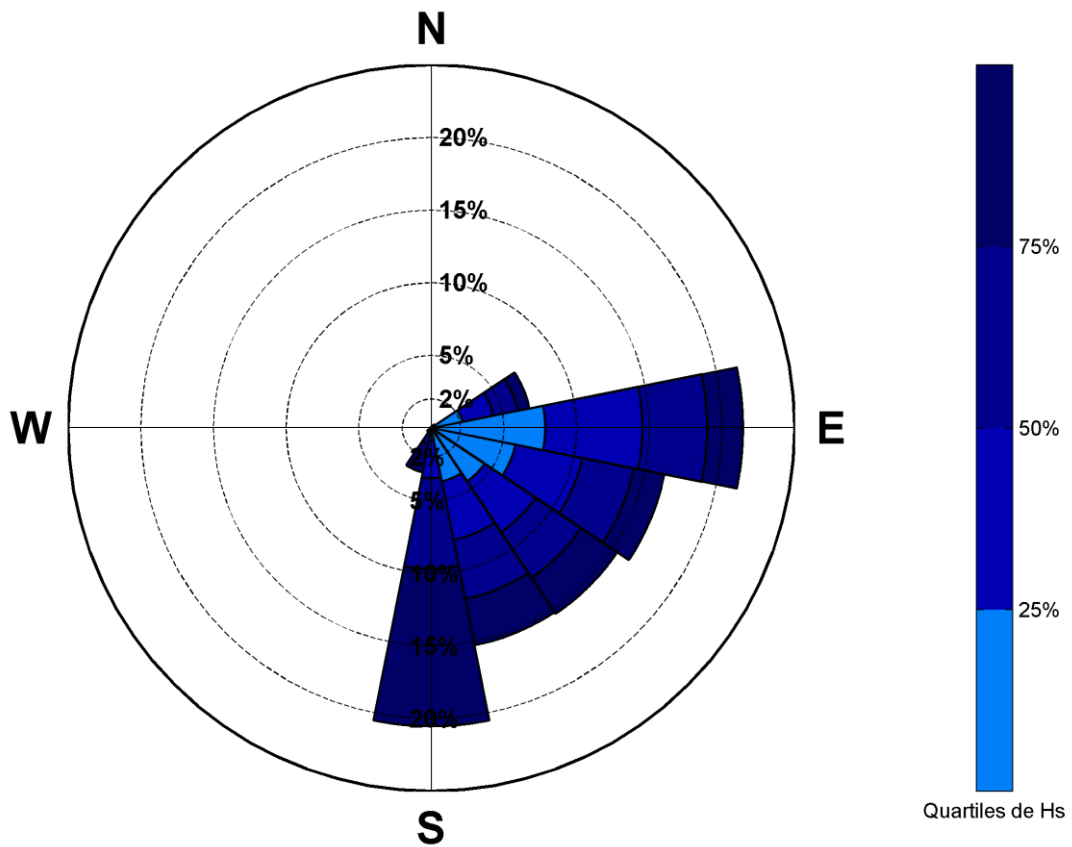
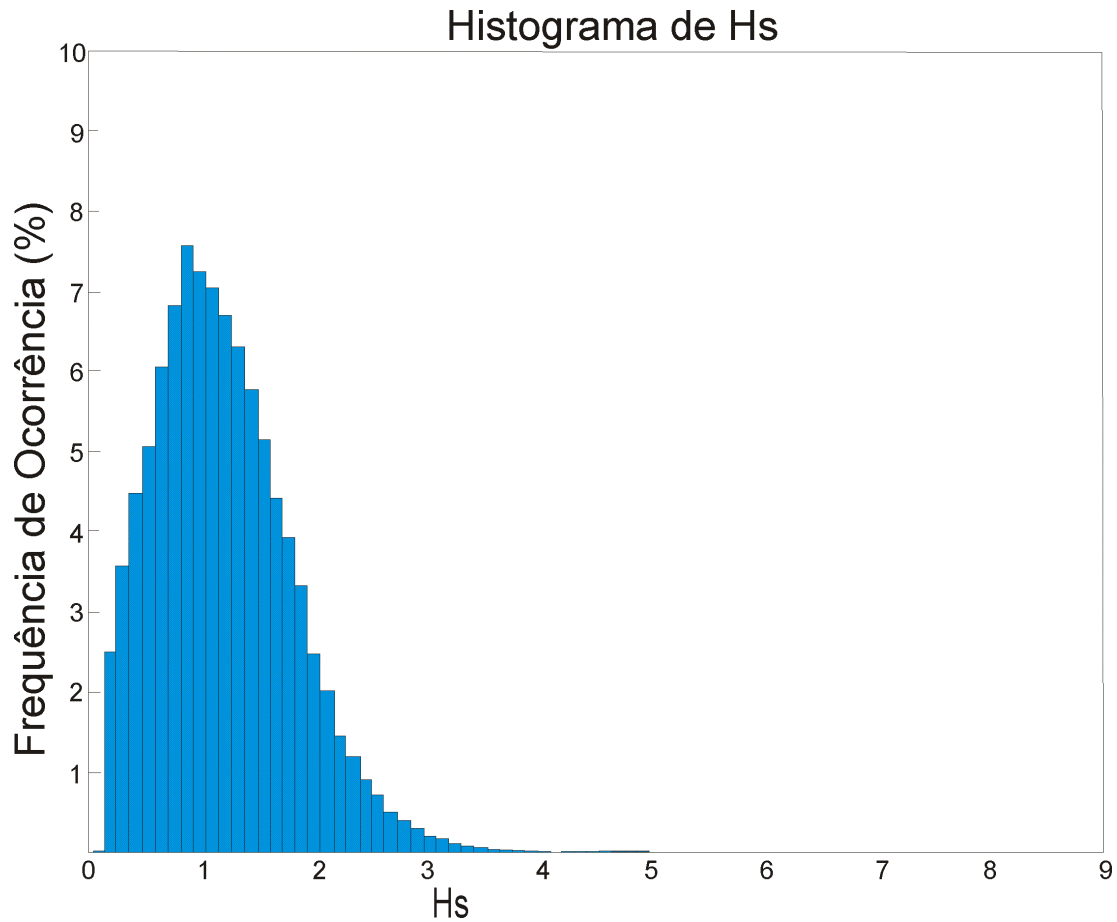


Figura 26 Rosa direcional de  $H_s$  para águas profundas em frente à Enseada do Itapocorói.

#### 3.4. 2. Enseada do Itapocorói – próximo à costa.

Próximo à costa observa-se uma diminuição da altura significativa de ondas (Figura 27). As ondulações mais frequentes possuem altura significativa por volta de 1 m, sendo a maior encontrada de 5,2 m, altura consideravelmente inferior aos registros obtidos para águas profundas (8 m).



**Figura 27** Histograma de altura significativa de onda próxima à costa na Enseada do Itapocorói.

Observando a rosa direcional de H<sub>s</sub> para a Enseada do Itapocorói, nota-se que as ondas chegam predominantemente de Sudeste (Figura 28). Isto se deve à presença da Ilha de Santa Catarina (Figura 22) e do promontório da Penha (Figura 23), que geram uma zona de sombra na enseada, protegendo-a das ondulações de Sul. Ondas de Leste e Nordeste também estão presentes, contudo, em menor frequência.

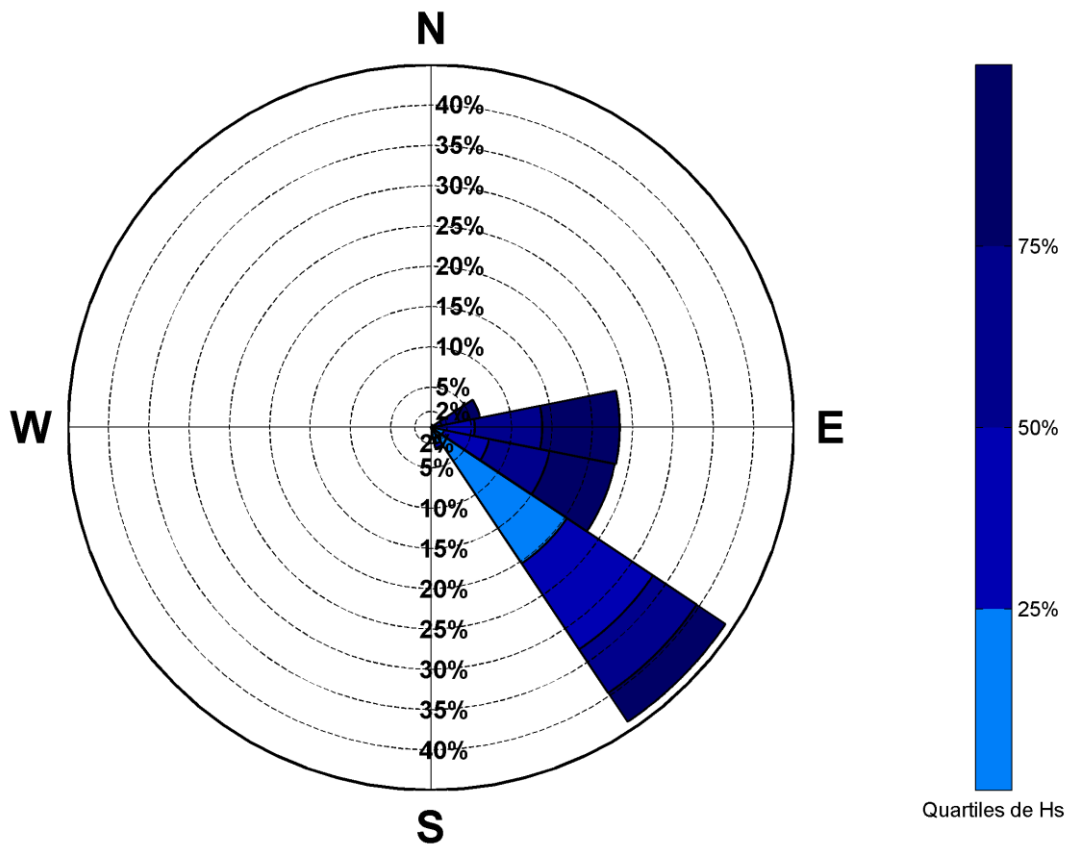
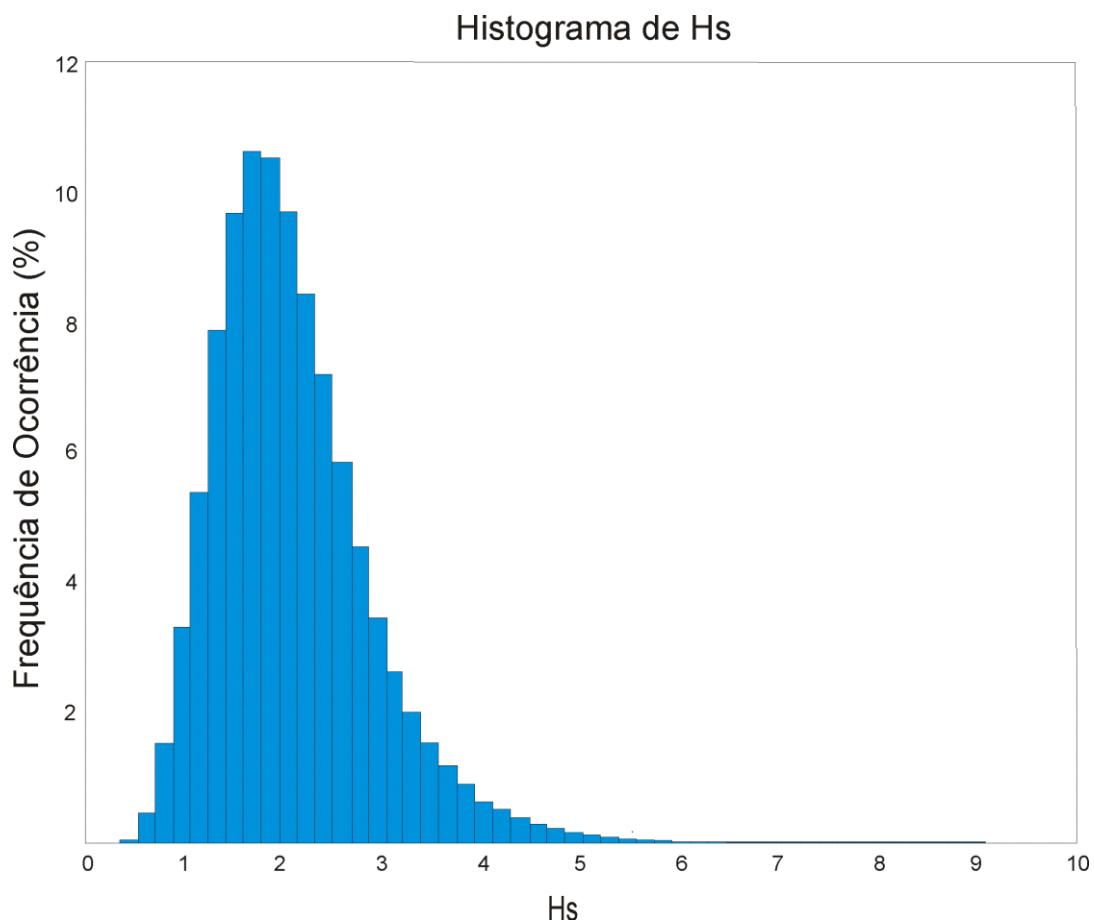


Figura 28 Rosa direcional de Hs para a Enseada do Itapocorói.

### 3.4.3. Morro dos Conventos - águas profundas

A Figura 29 apresenta a frequência de altura significativa de ondas em águas profundas no ponto mais próximo à praia de Morro dos Conventos (Figura 17). Nota-se que as alturas significativas de onda de maior frequência estão em torno dos 2 m. Além disso, ondas maiores que 5 m, embora pouco frequentes, estão presentes. Analisando a série completa de 60 anos, observa-se o maior valor de  $H_s$  de 9,2 m, relacionado à direção de  $280^\circ$  (Oeste), a qual se propaga para o mar aberto.



**Figura 29** Histograma de altura significativa de onda em águas profundas mais próximo à praia de Morro dos Conventos.

A rosa direcional apresentada na **Figura 30** mostra as propagações de ondas em águas profundas próximo à área de estudo. As direções com maior ocorrência estão entre Leste-Nordeste e Sul-Sudoeste. As maiores alturas de onda (até 9,2 m), contudo, estão relacionadas ao quadrante Oeste-Noroeste, as quais se propagam em direção ao mar aberto. Segundo Araújo et al. (2003), as ondulações de Leste são predominantes na primavera. No verão existe um equilíbrio entre vagas de Leste e marulhos de Sul. Nos meses de inverno, marulhos de Sul predominam em relação às vagas de Leste. Já no outono, marulhos de Sul dominam, com presença de vagas de Leste e Sul. Desta maneira, a rosa direcional mostra um predomínio de marulhos de Sul (**Figura 30**). Os dados corroboram com o estudo desenvolvido por Signorin (2010) na região próxima ao Morro dos Conventos.

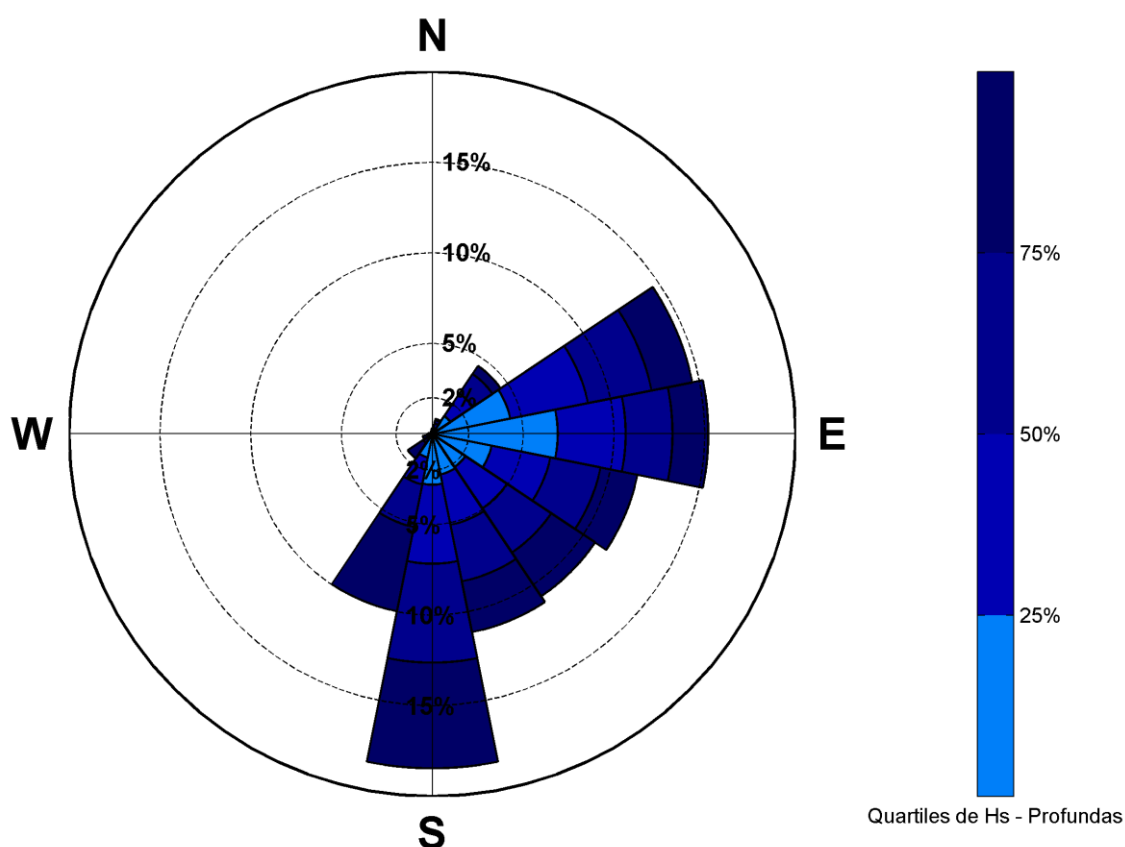


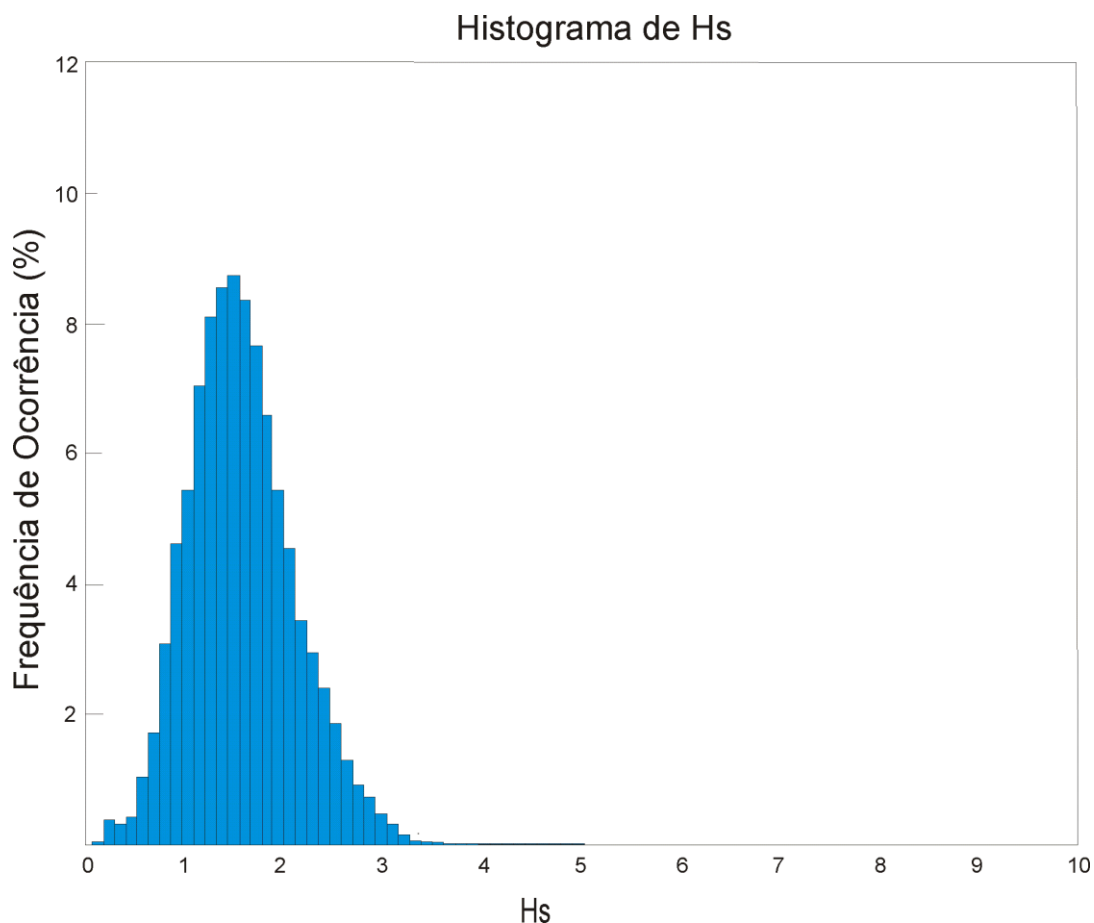
Figura 30 Rosa direcional de  $H_s$  para águas profundas em frente à praia de Morro dos Conventos.

#### 3.4.4. Morro dos Conventos – próximo à costa

Após a propagação dos casos selecionados para águas rasas, a série foi reconstruída em 6 pontos sobre a isobatimétrica de 15 m. Esses foram comparadas entre si e não apresentaram diferenças entre os resultados. Isso se deve ao homogêneo grau de exposição da praia às mais diferentes direções de ondulação, bem como à batimetria com isóbatas paralelas à linha de costa e, conseqüentemente, refratando as ondas de modo uniforme. Nesta seção serão apresentados os resultados para o ponto 3, próximo à desembocadura do Rio Araranguá (Figura 24)

Observa-se, na Figura 31, a distribuição dos valores de altura significativa em águas rasas, sendo 1,5 m a média mais frequente. Comparativamente, estas ondas apresentam menor altura em relação às ondas de águas profundas (Figura 29). Em relação aos eventos extremos, o maior valor encontrado de  $H_s$  foi de 5,9 m para a série de dados de 60 anos, o qual está relacionado à direção de incidência com  $138^\circ$  (SE), em contraponto aos valores extremos encontrados para a série em águas profundas provenientes de Oeste.





**Figura 31** Histograma de altura significativa de onda em próximo à praia de Morro dos Conventos - ponto 3.

A **Figura 32** apresenta a rosa direcional próxima à costa. Comparativamente, à situação de águas profundas (**Figura 30**), as ondulações de Oeste e Sudoeste diminuem de modo considerável sua ocorrência e aquelas provenientes de Sul, antes mais frequentes, se apresentam no ponto 3 como ondas de Sul-Sudeste (quadrante Sul), de acordo com os dados de Siegle e Asp (2007) que as descrevem como as mais frequentes e de maior intensidade. Da mesma maneira, as ondas de Leste-Nordeste se concentram no quadrante Leste, sendo essas, juntamente com aquelas de Sul-Sudeste, as mais frequentes. A diminuição da quantidade de direções próximas à costa pode ser explicada por dois fatores principais: o primeiro, relacionado às ondas que se propagam em direção ao mar aberto (Oeste, Noroeste), e o segundo, relativo ao processo de refração, que tende a direcionar as cristas paralelamente à costa.

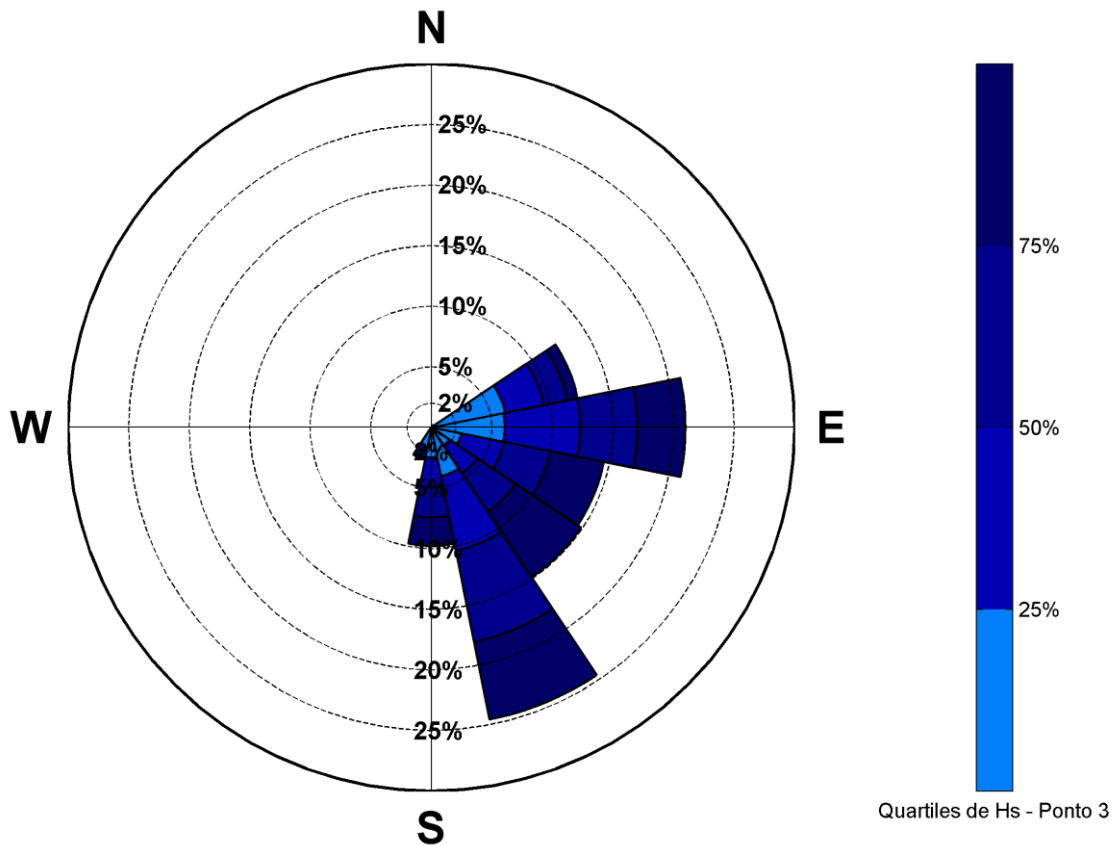


Figura 32 Rosa direcional de  $H_s$  para águas rasas - ponto 3 - praia de Morro dos Conventos.

#### 4.5. Conclusão

Para a análise de eventos extremos a qualidade dos dados é essencial. Os dados de onda medidos para a costa do Brasil são raros e, quando existem, apresentam-se em séries curtas e/ou descontínuas. Desta maneira, dados modelados - gerados a partir do vento - são uma ótima alternativa. Contudo, esses dados normalmente estão disponíveis somente para águas profundas, sendo necessária a transferência dos mesmos para próximo da costa.

Modelos matemáticos têm sido cada vez mais explorados pelos que estudam a zona costeira. Estes representam de forma adequada os principais processos de transformação de ondas. O modelo SWAN, utilizado em ambas as áreas de estudo é um excelente exemplo, tendo ótimo desempenho em grandes domínios de cálculo.

A seleção de casos *MaxDiss* e a reconstrução RBF são uma ótima maneira de diminuir tempo computacional, viabilizando a transferência de uma série completa de longo período para águas rasas. Com a integração dos métodos, torna-se possível obter cenários realistas

dos parâmetros ondulatórios próximos à costa de maneira relativamente simples e com baixo custo computacional.

Os resultados obtidos mostram claramente as mudanças que as ondas sofrem ao se propagarem de águas profundas próximo da costa. De um modo geral, a altura de onda diminui em função dos processos de dissipação de energia com o fundo e refração. Em ambas as áreas houve uma redução considerável da ordem de 3 m nas máximas alturas significativas de onda. Na Enseada do Itapocorói, a maior parte das ondas se concentra entre 1,5 m e 2 m, sendo a maior altura significativa encontrada de aproximadamente 8 m. Próximo à costa, as ondas são na sua maioria de Sudeste, com menor influência de Leste e Leste-Sudeste, sendo a maior altura significativa encontrada de 5,2 m. Para a praia de Morro dos conventos, as direções predominantes em águas profundas são de Sul e Leste-Nordeste e a altura predominante está em torno de 2 m, chegando à altura máxima de 9,2 m (Oeste). Próximo da costa, a maior frequência de ocorrência está em torno de 1,5 m observando-se a altura significativa máxima de 5,9 m (Sudeste). Ondas que se propagam em direção ao mar aberto, embora sejam importantes e algumas vezes tenham as maiores alturas significativas, não chegam à costa, apresentando-se nestes locais como situações de calmarias, ou com menor tamanho de onda, sob influência apenas do vento local.

A partir das colocações acima, percebe-se a importância e justifica-se a propagação de ondas para próximo da costa quando essas não estão disponíveis na zona de estudo. Desta maneira, os parâmetros ondulatórios que serão utilizados no cálculo do *wave run-up*, tornam-se mais realistas.

## CAPÍTULO 4 – *Wave Run-up*

Dentre os componentes da cota de inundação, o *wave run-up* é um dos mais importantes, gerando inundação instantânea e contribuindo significativamente para a erosão de praias. Esse é composto pelo empilhamento de água na costa devido à quebra de ondas (*wave set-up*) e pelo espriamento da onda na face da praia (Figura 33).

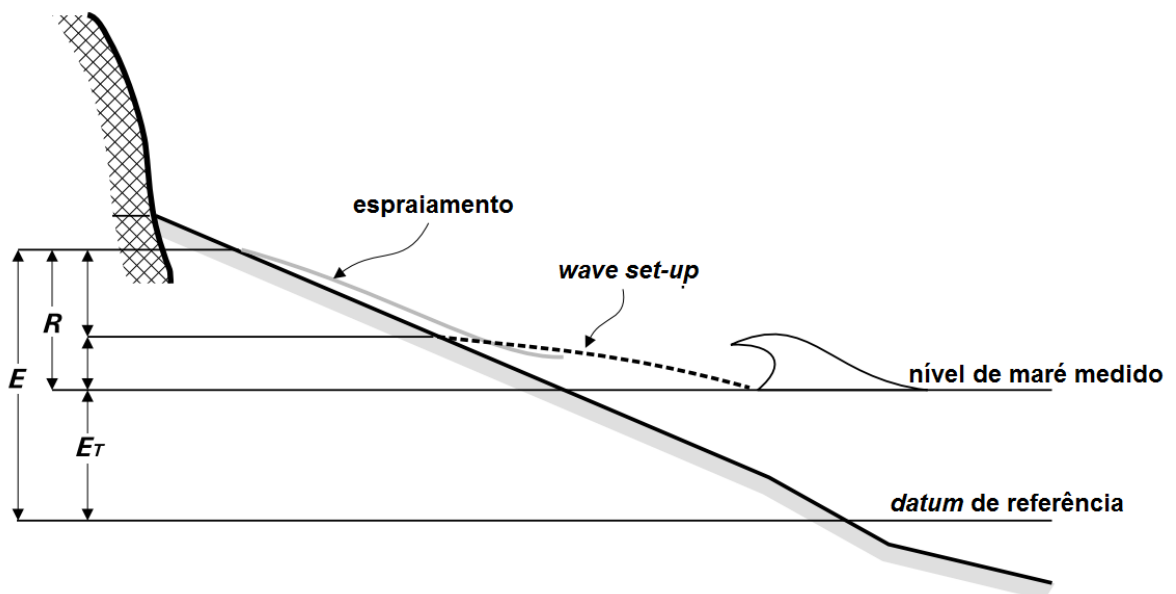


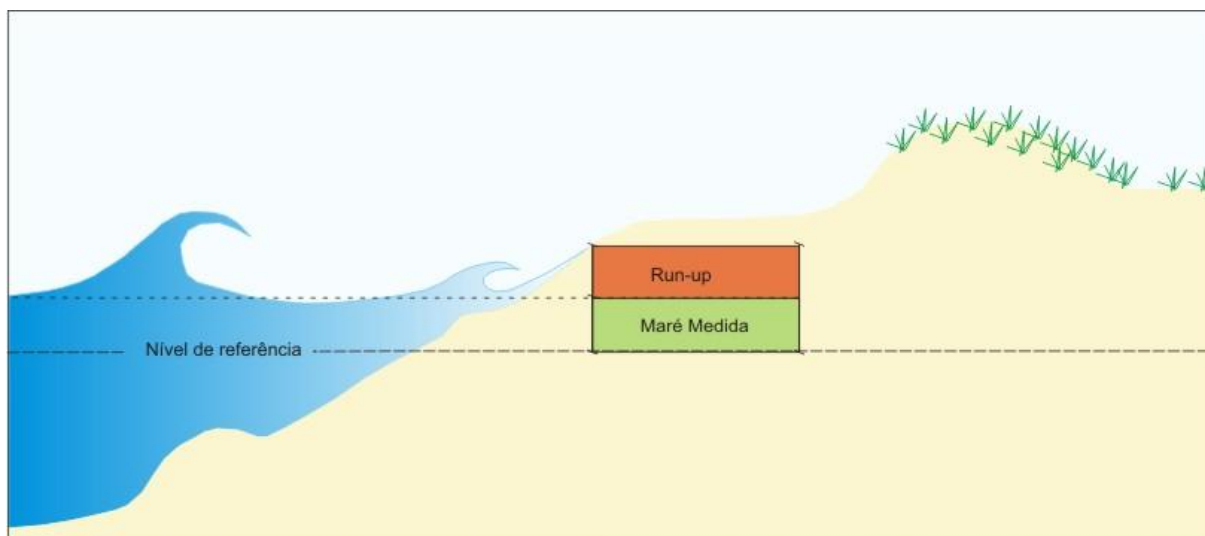
Figura 33 *Wave run-up*: composto pelo *wave set-up* e espraiamento da onda na face da praia. Modificado de Ruggiero et al. (1997).

De acordo com Ruggiero et al. (2001), a erosão de dunas ou falésias induzida pela ação das ondas ocorre quando o máximo *wave run-up* excede a cota da base dessas feições morfológicas (Figura 34). Desta maneira, conhecer o comportamento do *wave run-up* em uma praia é importante para prevenir os impactos gerados pela inundação da costa, bem como a erosão de praias.



Figura 34 Efeito do *wave run-up* na praia de Copacabana (RJ). Fonte: <http://extra.globo.com/noticias/rio/ressaca-invade-pistas-da-orka-do-rio-veja-fotos-1909709.html>.

De acordo com CERC (2002), *wave run-up* é a elevação máxima da onda, no encontro com a costa, acima do nível médio medido no momento (Figura 35) e pode também ser definido como o local de maior pico de elevação instantânea de água ( $\eta$ ) na costa. O limite do *wave run-up* é um importante parâmetro para se estabelecer a porção ativa do perfil de praia. Em engenharia costeira, o conhecimento desse processo é fundamental para o planejamento de uma obra de proteção ou contenção. Neste âmbito, vários autores estudaram e descreveram o comportamento do *wave run-up* sobre estruturas ou situações controladas de laboratório (van der Meer e Stam, 1992; CERC, 2002; TAW, 2002; Huges, 2003). Entretanto, quando se considera uma praia, sem estruturas rígidas, as formulações utilizadas pelos autores supracitados não respondem adequadamente. Neste contexto, alguns pesquisadores desenvolveram estudos empíricos ou a partir de medições em campo (Holman e Guza, 1984; Holman, 1986; Nielsen e Hanslow, 1991; Ahrens, J.P., e Seelig, W.N., 1996; Ruggiero et al. 2001, Ruggiero et al. 2004; Shand et al., 2007). Este capítulo apresenta os cálculos do *wave run-up* utilizados para integrar o cálculo da cota de inundação (Capítulo 5). Para isso foram utilizadas fórmulas disponíveis na literatura as quais foram calibradas para praias de enseada a partir de trabalhos desenvolvidos em campo.



**Figura 35** *Wave run-up*: elevação máxima da onda acima do nível médio medido para um determinado momento.

Nos estudos acima citados, os autores buscaram relações entre vários parâmetros, como a elevação instantânea de água ( $\eta$ ), altura significativa de ondas ( $H_s$ ), parâmetro de similaridade de surfe ( $\xi$ ), esbeltez da onda ( $H_s/L_0$  - altura significativa/ comprimento de onda em águas profundas), entre outros.

Dentre as formulações mais utilizadas na literatura pode-se citar a desenvolvida por Nielsen e Hanslow (1991). Segundo os autores, o *wave run-up* excedido por 2% dos casos analisados pode ser descrito a partir das equações abaixo:

$$R_{2\%} = 1,98 \times (0,6(H_{orms} \times L_0)^{0,5} \tan\beta_F)$$

para  $\tan\beta \geq 0,10$ , ou

$$R_{2\%} = 1,98 \times (0,05(H_{orms} \times L_0)^{0,5})$$

para  $\tan\beta < 0,10$ .

onde  $R_{2\%}$  é o *wave run-up* excedido por 2% dos casos analisados,  $H_{orms}$  é a média geométrica da altura de todas as ondas medidas (para gerar um dado horário, por exemplo),  $L_0$  é o comprimento de onda em água profunda e  $\tan\beta_F$  é referente à declividade da face da praia.

#### 4.1. Metodologia

A partir dos dados de onda próximos à costa descritos no capítulo 3, foi calculado o *wave run-up* para toda a série. Entretanto, como as equações disponíveis na literatura são aplicadas a praias expostas, neste trabalho também foi desenvolvida uma metodologia para

calibrar as equações propostas para praias de enseada. Esta metodologia está resumida na Figura 36.

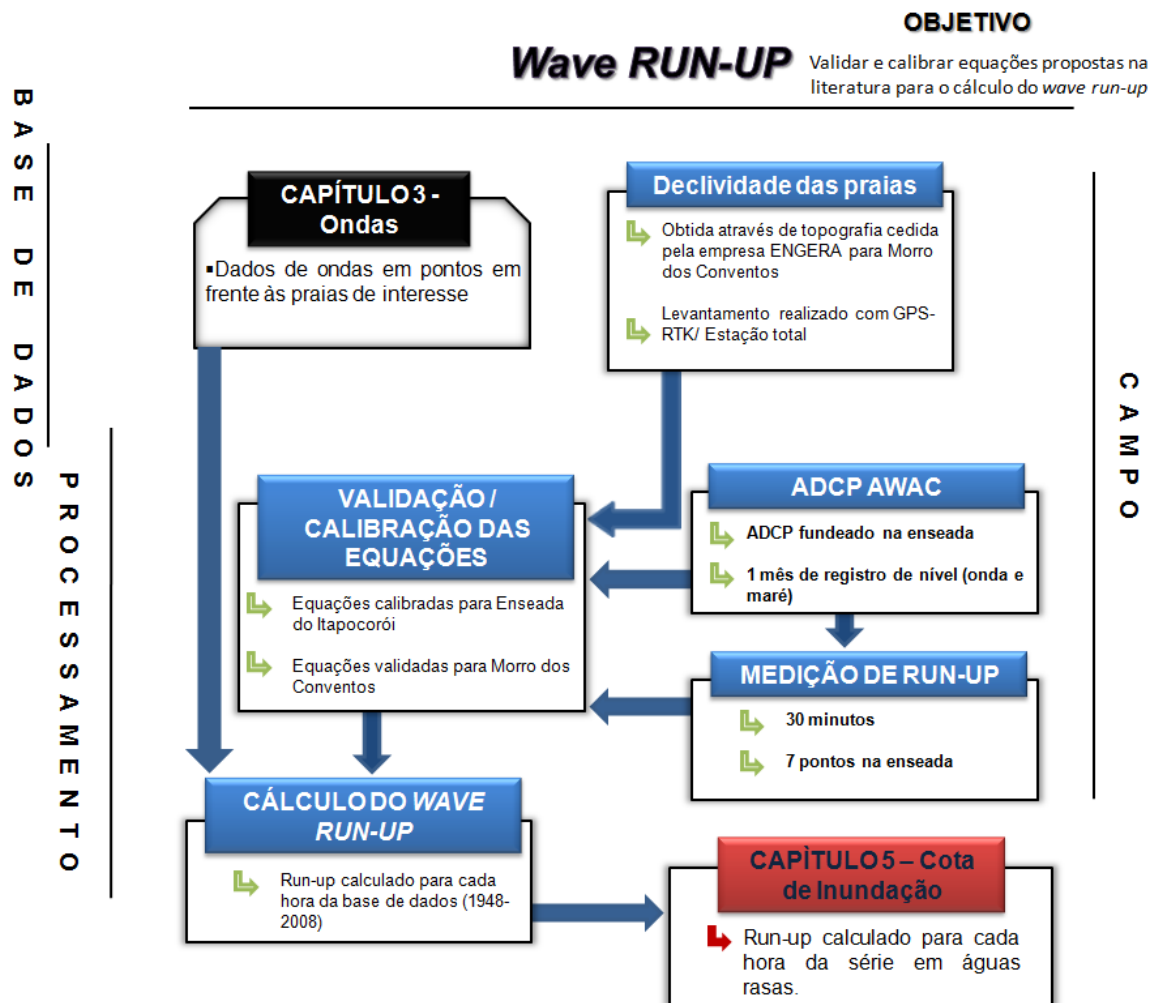
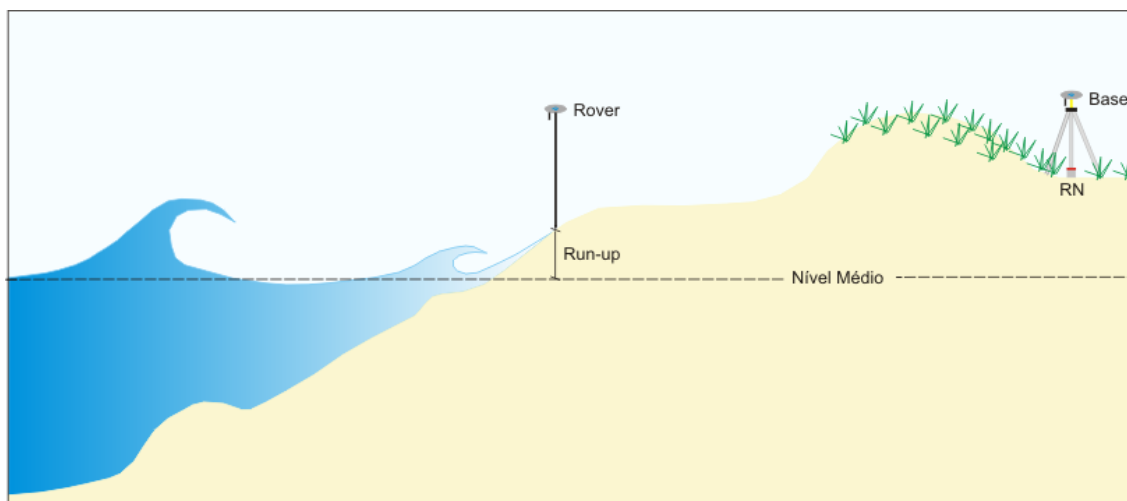


Figura 36 Metodologia utilizada para calibração, validação e cálculo do *wave run-up*.

#### 4.1.1. Campo Enseada do Itapocorói

Com a finalidade de calibrar as equações do *wave run-up* para praias de enseada (Enseada do Itapocorói) e validá-las para expostas (Morro dos Conventos), foi realizada uma campanha de campo durante os meses de agosto e setembro de 2011, totalizando 13 dias, sendo 6 no mês de agosto (dias 20, 22, 24, 26, 29 e 31) e outros 7 dias em setembro (dias 2, 5, 12, 14, 16, 19, 21), quando foi medido o *wave run-up* na praia com a utilização de um GPS-RTK de precisão geodésica. Para isso, foi instalada uma antena base em um ponto conhecido na orla, enquanto com a outra fez-se medições de Norte, Leste, Cota (Figura 37) e horário (hh:mm:ss).



**Figura 37** Medição do *wave run-up* para posterior cálculo da cota de inundação.

Até o dia 5 de setembro foram medidos *wave run-up* em 7 pontos localizados na enseada em frente aos referenciais de nível. Paralelamente, foram levantados perfis topográficos transversais à praia com uma estação total para obtenção da declividade da face da praia. A partir do dia 12 de setembro, foi adicionado outro local de observação em frente ao RN denominado 25, totalizando 8 perfis (Figura 38).

Durante o período das campanhas de campo de agosto e setembro foi fundeado um ADCP NORTEK AS®, modelo AWAC 600 kHz, na profundidade aproximada de 15 m (Figura 38), que mediu o nível d'água em alta frequência (600 kHz) durante 20 minutos em cada hora, no período entre 19/08/2011 e 22/09/2011, gerando dados de correntes, ondas e marés. A escolha dos pontos para medição do *wave run-up* se deu em função dos diferentes graus de exposição da praia às ondas (Figura 38).





Figura 38 Localização do fundeio do equipamento ADCP e os pontos onde foram medidos *wave run-up*. Em verde os pontos medidos desde agosto e, em vermelho aquele adicionado em setembro.

Para a medição do *wave run-up* nos perfis 1, 3, 5 e 7, a base do GPS-RTK ficou situada no molhe (na desembocadura do Rio Piçarras, próximo ao perfil 5) e para os demais perfis, a base ficou sobre o RN homônimo (Figura 39).

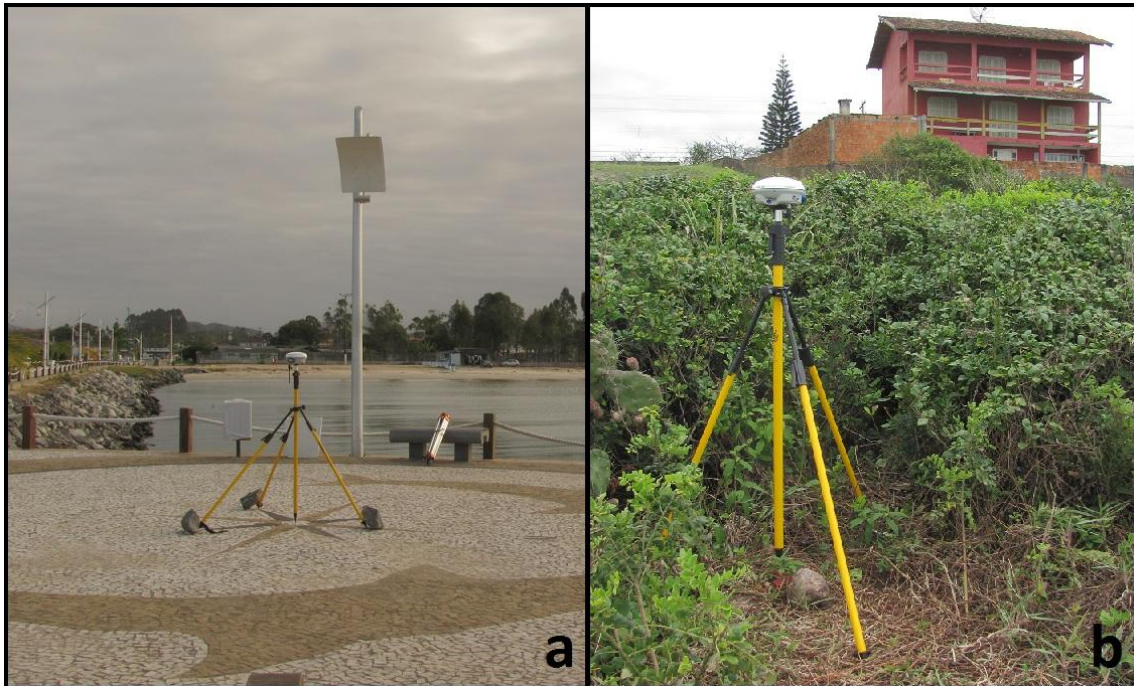


Figura 39 Posição da base RTK. a) sobre o molhe, b) sobre o RN 47.

Com a base devidamente posicionada, a haste da antena móvel (*rover*) foi colocada no ponto de máximo espraiamento de cada onda sobre a face da praia (Figura 40). Em cada ponto ao longo da enseada, foram coletados dados continuamente durante 30 minutos, que resultou numa média aproximada de 200 medições/levantamento/perfil.



Figura 40 Método de medição do *wave run-up*. Para cada espraiamento de onda foi coletado um dado. Foto: Diego Bitencourt.

#### 4.1.2. Calibração das equações para praias de enseada

A partir dos parâmetros ondulatórios obtidos pelo ADCP (Tabela 3) e pela declividade obtida através de levantamento com a Estação Total, foi calculado o *wave run-up* excedido por 2% das ondas através das equações propostas por Nielsen e Hanslow (1991) para cada perfil.

**Tabela 3** Dados obtidos pelo ADCP AWAC durante o período de levantamento de campo no dia 21/09/2011. A partir desses dados foram calibradas as equações propostas por Nielsen e Hanslow (1991).

Hora	Hs (m)	Tp (s)	Dir (graus)
09:00	1.44	8.58	109.24
10:00	1.4	8.02	107.98
11:00	1.22	8.47	105.86
12:00	1.28	8.49	104.46
13:00	1.3	7.93	102.95
14:00	1.23	8.42	103.86
15:00	1.11	8.35	106.04
16:00	1.13	8.35	107.18
17:00	1.15	7.59	106.25

Embora os dados de altura média de onda utilizados pelos autores tenham sido obtidos em águas profundas, neste trabalho foram utilizados os dados de altura significativa medidos pelo ADCP AWAC a 15 m de profundidade. Além disso, foi necessária a conversão de altura significativa em altura média de ondas através da relação descrita por Holthijzen (2007):

$$H_{0rms} = \frac{1}{2} \sqrt{2} H_s$$

O comprimento de onda em águas profundas necessário para a aplicação das fórmulas propostas pelos autores foi obtido através da relação:

$$L_0 = 1,56 * T_p^2$$

Os dados calculados através das fórmulas propostas pelos autores foram comparados com os dados medidos em campo com o GPS-RTK. A partir desses resultados pôde-se dividir a praia em 4 setores (Figura 41) em função do grau de exposição às ondas, sendo esses denominados de protegido (entre os pontos 1 e 7), semiprotégido (entre 7 e 25), semiexposto (entre 25 e 40) e exposto (entre 40 e 50).



Figura 41 Setores de calibração das fórmulas.

Para cada setor foi feita uma regressão linear entre os dados calculados a partir das equações de Nielsen e Hanslow (1991) e medidos em campo com a intenção de ajustar as fórmulas propostas. Para analisar a eficiência do ajuste, foi calculado o EQM (erro quadrático médio) entre os valores medidos e os calculados por ambas as fórmulas (Nielsen e Hanslow, 1991 e calibrada) através da equação:

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} * (x_1^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$$

onde n é o número de amostras;

x é a diferença entre o valor calculado e o valor medido.

#### 4.1.3. Validação das equações para praias expostas

Para as praias expostas como Morro dos Conventos, as fórmulas propostas por Nielsen e Hanslow (1991) vêm sendo utilizadas em todo o mundo por diversos pesquisadores, cientistas e engenheiros. Além disso, foram analisadas as correlações entre os dados dos setores exposta e semiexposta da praia da Enseada do Itapocorói. Esses setores são os

que mais se assemelham às regiões que serviram de base para a elaboração das equações.

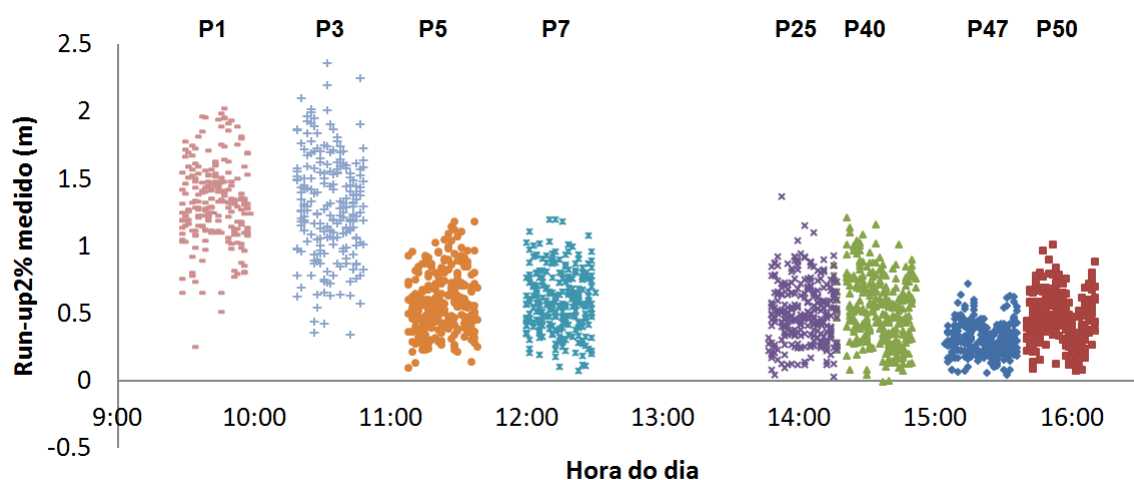
#### 4.1.4. Cálculo do *wave run-up*

De posse da série completa de dados modelados de onda entre 1948 e 2008 em águas rasas e das equações calibradas e validadas, foi calculado o *wave run-up* para cada hora dos 60 anos da série próxima à costa em função das características das ondas no momento. Desta maneira, obteve-se o valor do *wave run-up* utilizado no cálculo da cota de inundação (Capítulo 5).

## 4.2. Resultados e Discussão

### 4.2.1. Campo - Enseada do Itapocorói

Os dados de cota medidas no campo foram transformados em valores de *wave run-up* 2% e o exemplo do dia 21 de setembro de 2011 para cada perfil praiial está apresentado na Figura 42.



**Figura 42** *Wave run-up* 2% medido no dia 21/09/2011. Notam-se maiores cotas atingidas pelo espriamento das ondas nos perfis mais expostos (P 50, 47, 40 e 25).

É possível observar que as maiores variações do espriamento e as maiores cotas atingidas se dão nos perfis mais expostos. Isso se deve ao fato de que, nesses locais, as ondas são maiores, pois não sofrem de maneira tão intensa o processo de difração imposto pela presença de ilhas e promontórios e também pelas características da face da praia consideravelmente mais íngreme na região mais exposta (Figura 43).

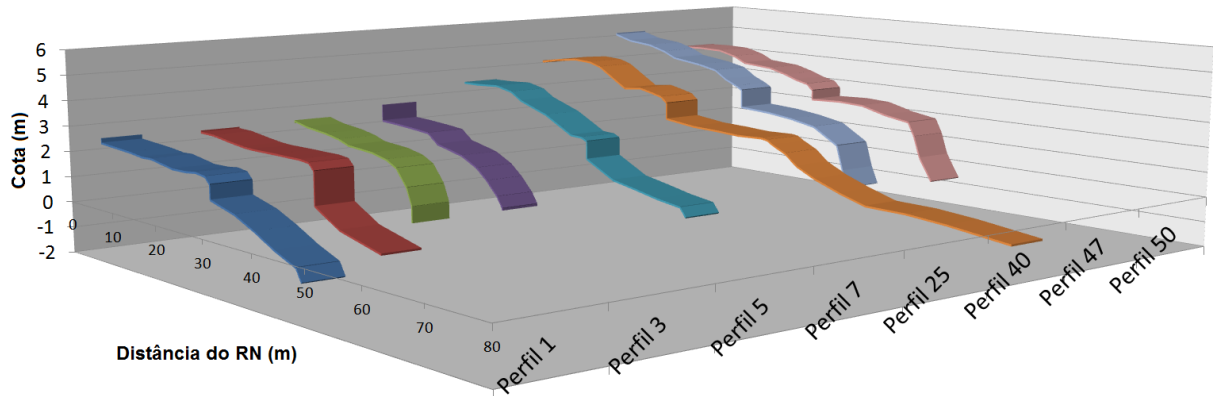


Figura 43 Perfis de praia - Enseada do Itapocorói dia 21/09/2011.

#### 4.2.2. Calibração das equações para praias de enseada

A Figura 44 apresenta a regressão linear feita entre os dados de  $R_{2\%}$  medido e calculado para o setor protegido, que compreende a área entre os pontos 1 e 7. Obteve-se um EQM para a equação não calibrada de 1,09 m e para a equação calibrada o EQM foi de 0,19 m, mostrando a eficiência na calibração da equação.

A equação calibrada para o setor protegido é dada por:

$$R_{2\%protegido} = 0,269 * R_{2\%Nielsen e Hanslow (1991)} + 0,360$$

onde:

$R_{2\%protegido}$  é a equação calibrada para o setor protegido;

$R_{2\% Nielsen e Hanslow (1991)}$  é o *wave run-up* excedido por 2% dos casos, calculado através da equação de Nielsen e Hanslow (1991).

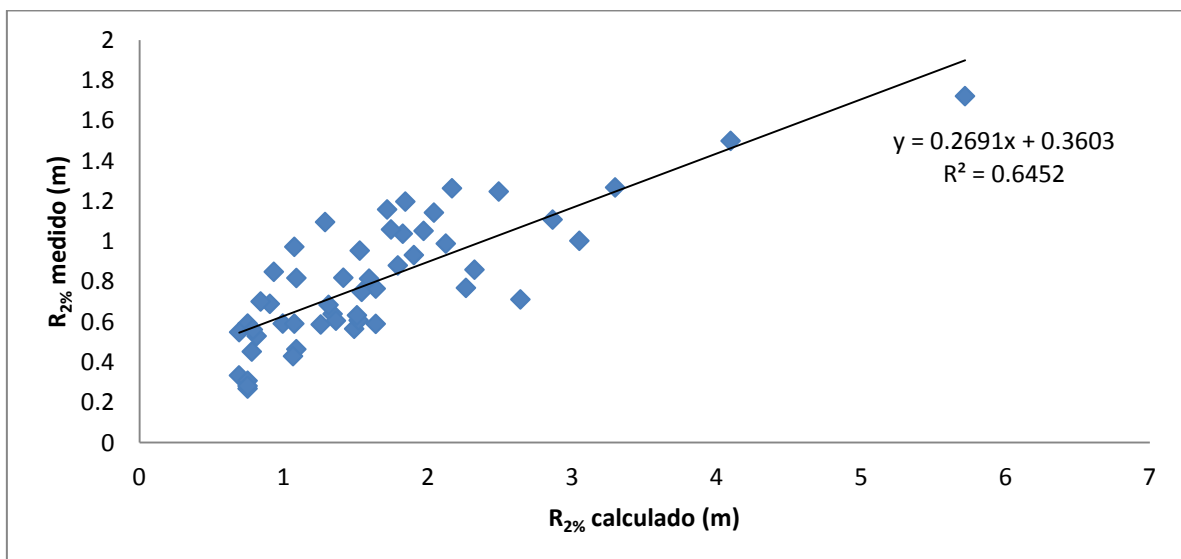


Figura 44 Relação entre  $R_{2\%}$  calculado e  $R_{2\%}$  medido para o setor protegido.

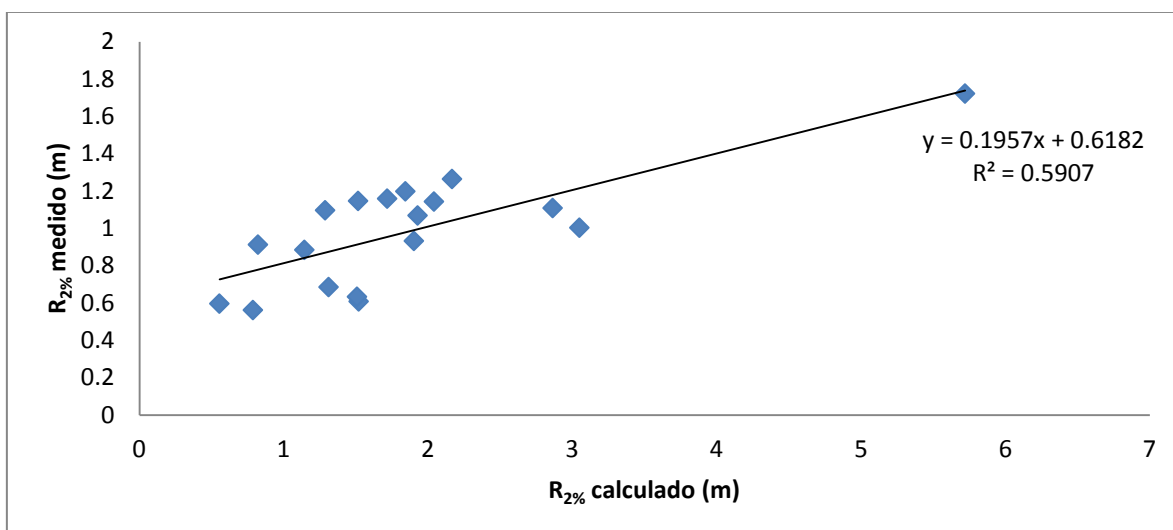
Para o setor semiprottegido (Figura 45 - entre os pontos 7 e 25), obteve-se uma EQM para a equação não corrigida de 1,28 m e para a corrigida de 0,18 m. A equação calibrada para este setor é dada por:

$$R_{2\%semiprottegido} = 0,195 * R_{2\%Nielsen e Hanslow (1991)} + 0,59$$

onde:

$R_{2\%semiprottegido}$  é a equação calibrada para o setor semiprottegido;

$R_{2\% Nielsen e Hanslow (1991)}$  é o *wave run-up* excedido por 2% dos casos calculado através da equação de Nielsen e Hanslow (1991).



**Figura 45** Relação entre  $R_{2\%}$  calculado e  $R_{2\%}$  medido para o setor semiprottegido.

No setor semiexposto (entre os pontos 25 e 40), a regressão é apresentada na Figura 46 e a equação calibrada é dada por:

$$R_{2\%semiexposto} = 0,529 * R_{2\%Nielsen e Hanslow (1991)} + 0,421$$

onde:

$R_{2\% semiexposto}$  é a equação calibrada para o setor semiexposto;

$R_{2\% Nielsen e Hanslow (1991)}$  é o *wave run-up* excedido por 2% dos casos calculado através da equação de Nielsen e Hanslow (1991).

O EQM calculado para a equação não corrigida foi de 0,43 m e para a equação calibrada foi de 0,17 m.

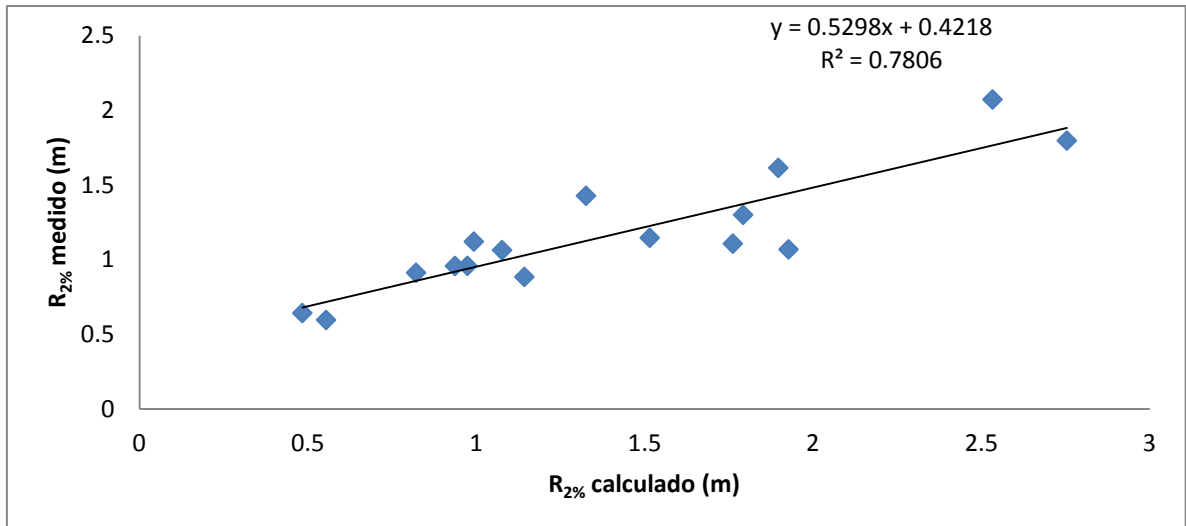


Figura 46 Relação entre  $R_{2\%}$  calculado e  $R_{2\%}$  medido para o setor semiexposto.

A regressão linear para o setor exposto é apresentada na Figura 47. O EQM calculado para a equação não calibrada foi de 0,48 m e para a equação calibrada foi de 0,37. Essa foi a menor diferença encontrada entre as equações originais e calibradas entre os setores. Isso se deve ao fato da equação ter sido desenvolvida para praias expostas e a região Norte da Enseada do Itapocoró é a área mais exposta, recebendo praticamente todas as ondulações.

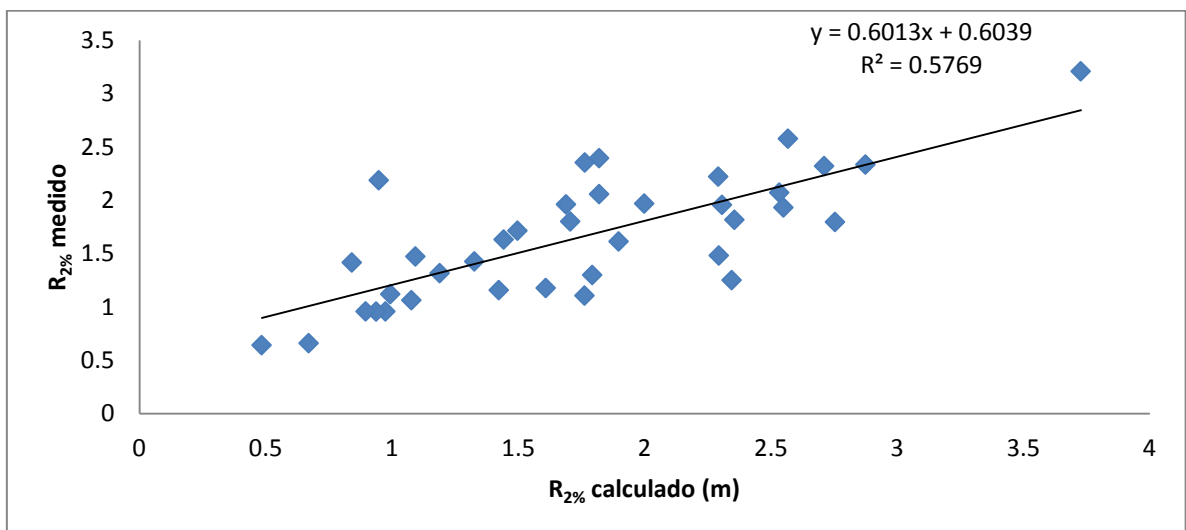


Figura 47 Relação entre  $R_{2\%}$  calculado e  $R_{2\%}$  medido para o setor exposto.

A equação calibrada para o setor é dada por:

$$R_{2\%exposto} = 0,601 * R_{2\%Nielsen e Hanslow (1991)} + 0,603$$

onde:

$R_{2\%exposto}$  é a equação calibrada para o setor exposto;



$R_{2\%}$  Nielsen e Hanslow (1991) é o *wave run-up* excedido por 2% dos casos calculado através da equação de Nielsen e Hanslow (1991).

#### 4.2.3. Validação das equações para praias expostas

A partir dos dados obtidos no item 4.2.2. notou-se que quanto mais exposta é a praia, menor a necessidade de calibração das equações propostas por Nielse e Hanslow (1991), comprovando a eficiência das mesmas para praias expostas, como as que os pesquisadores se basearam para desenvolvê-las. Além disso, os resultados de *wave run-up* medido e *wave run-up* calculado através da fórmula proposta por Nielsen e Hanslow (1991) foram comparados para todos os perfis medidos na Enseada do Itapocorói. O perfil 40, foi o que apresentou melhor ajuste com um  $R^2$  de 0,8316 (Figura 48). Desta maneira, a fórmula proposta foi utilizada sem a necessidade de calibração para a praia de Morro dos Conventos.

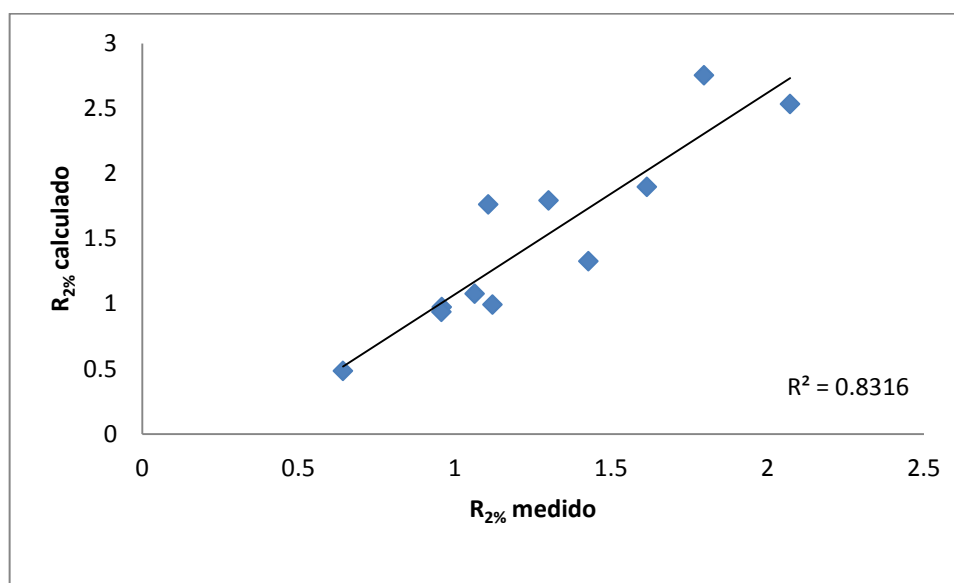


Figura 48 Relação entre o *wave run-up* medido e o calculado através da fórmula de Nielsen e Hanslow (1991).

#### 4.2.4. Cálculo do *wave run-up*

Com as equações devidamente calibradas para os diferentes setores da Enseada do Itapocorói e validadas para a praia de Morro dos Conventos, foi possível aplicar as fórmulas para cálculo do *wave run-up* sobre a série reconstruída próxima à costa. Para cada hora dos 60 anos de dados da série reconstruída, calculou-se o *wave run-up* instantâneo para ser utilizado no cálculo da cota de inundação. Na Enseada do Itapocorói, o valor médio de *run-up* excedido por 2% das ondas, calculado a partir das equações calibradas, foi de 0,65 m, 0,85 m, 1,00 m e 1,35 m para os setores protegido, semiprotégido, semiexposto e exposto,

respectivamente. Os valores mais elevados encontrados nos setores protegido, semiprotégido, exposto e semiesposto foram de 1,25 m, 1,40 m, 2,10 m e 2,50 m, respectivamente. Na praia de Morro dos Conventos, a média do  $R_{2\%}$  para toda a série foi de 1,00 m, atingindo valores extremos de 3,00 m.

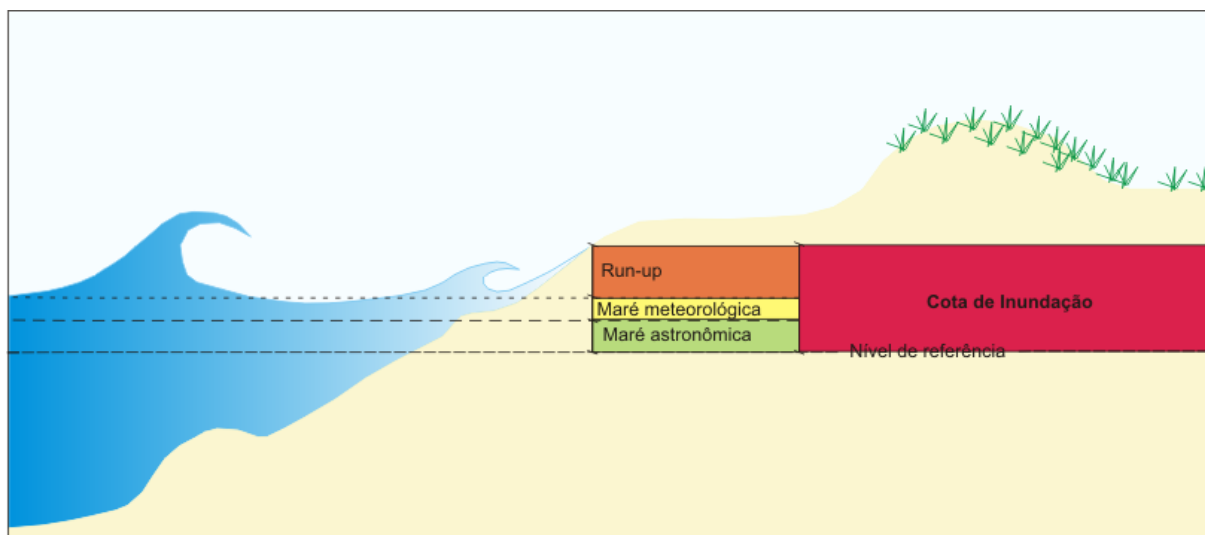
#### 4.3. Conclusões

O entendimento da excursão vertical da onda sobre a face da praia é fundamental para o cálculo da cota de inundação. Embora muitas fórmulas tenham sido descritas na literatura, todas são desenvolvidas para praias expostas com diferentes declividades. Através do experimento realizado em campo foi possível validar as equações para praias expostas, como a praia de Morro dos Conventos e calibrá-las para diferentes setores de uma praia de enseada como a Enseada do Itapocorói. A partir daí, foi possível calcular o *wave run-up* de forma mais realista para cada uma das horas entre 1948 e 2008 da série reconstruída em águas rasas.

A diferença entre os EQM calculados para as equações propostas na literatura e calibrados para cada setor da Enseada do Itapocorói foi maior no setor protegido (0,9 m) e apresentou uma tendência de diminuição em direção ao setor exposto (0,11 m). Isso comprova a importância da calibração das equações para praias protegidas e confirma a robustez das mesmas para praias expostas.

## CAPÍTULO 5 - Cota de Inundação

A cota de inundação é a cota topográfica atingida por um determinado evento extremo. Esta é dada pela soma da maré astronômica, da maré meteorológica (capítulo 2) e do *wave run-up* (no qual está inserido o *wave set-up* e o espreadimento da onda na face da praia - capítulo 4) em um dado momento, de acordo com a Figura 49.



**Figura 49** Cota de inundação: composta pela soma da maré astronômica, maré meteorológica e *wave run-up*.

Os fatores que governam a inundação podem ser considerados variáveis aleatórias. Assim, a representação da cota de inundação deve ser feita baseada em uma probabilidade de ocorrência dos eventos, ou o tempo de recorrência de um determinado evento. Quando a variável aleatória considerada é uma variável geofísica, usualmente se refere a período de retorno em vez de probabilidades de ocorrência (Garcia, 2008). O tempo de recorrência de uma variável é o intervalo, medido geralmente em anos, no qual um evento de determinada magnitude é igualado ou superado. Por exemplo, para um período de retorno de cota de inundação de 100 anos, significa que a probabilidade que esse ocorra em um ano é de 1%.

Neste capítulo os conceitos e resultados descritos nos capítulos anteriores serão utilizados para o cálculo da cota de inundação. Os resultados serão apresentados na forma de Cartas de inundação para diferentes cenários (área inundada durante 50% do tempo, com 50, 100 e 200 anos de tempo de recorrência).

## 5.1. Metodologia

Com o intuito de calcular a inunda o e construir cartas representando a área atingida pelos eventos extremos, foi seguida a metodologia resumida na Figura 50.

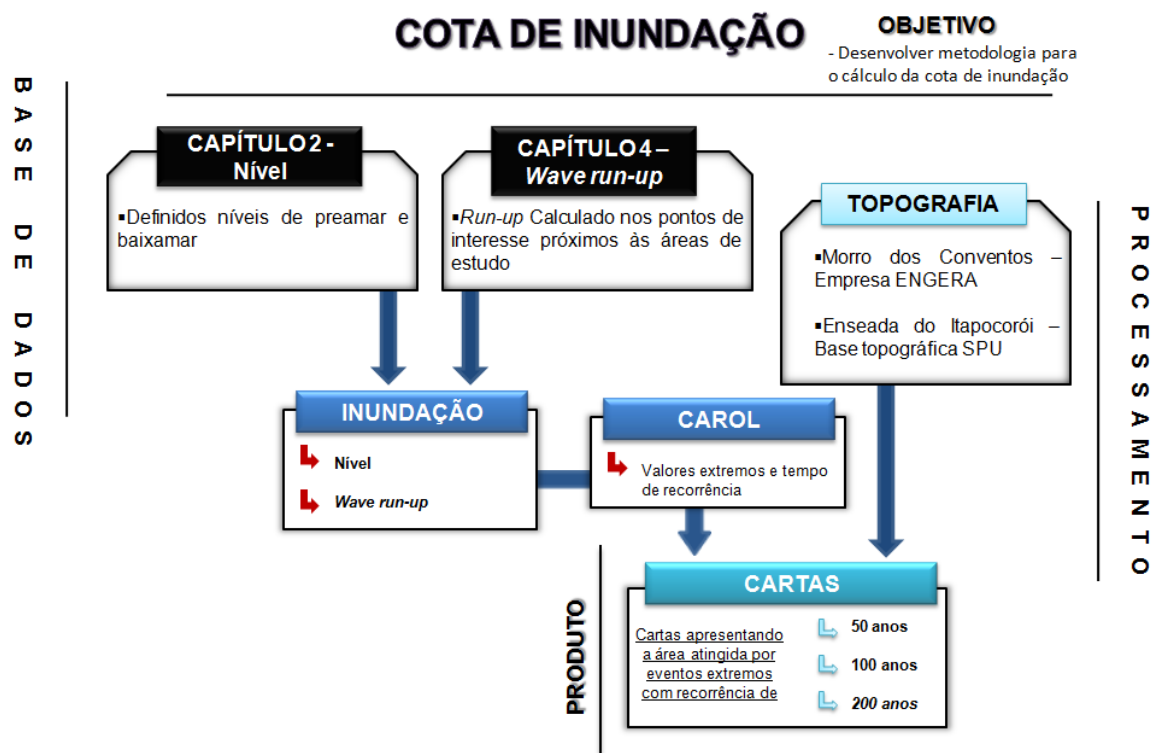


Figura 50 Metodologia adotada para o cálculo da cota de inunda o.

### 5.1.1 Cálculo da Cota de Inunda o

A cota de inunda o instantânea   calculada através da soma das marés astronômica e meteorológica (Capítulo 2) e do *wave run-up* (Capítulo 4) em um dado momento. As séries de maré astronômica, maré meteorológica e ondas (a partir da qual foi calculado o *wave run-up*) foram geradas para o mesmo período (1948 e 2008), apresentando intervalo padrão (horário). Desta maneira, a cota de inunda o instantânea foi calculada para cada hora dos 60 anos de dados através da soma dos três componentes. Esta foi levada   ferramenta estatística CAROL (ver 3.3.5 Caracteriza o dos regimes de ondas) onde foi calculado o período de retorno da cota de inunda o para 50, 100 e 200 anos.

Para calcular a recorrência dos eventos extremos   necessário obter os valores extremos estatisticamente e definir um modelo de extremos para o cálculo da recorrência dos eventos. Dessa maneira, foi escolhido o método de máximos anuais (Figura 51), no qual os valores máximos são definidos por período de tempo (ano).

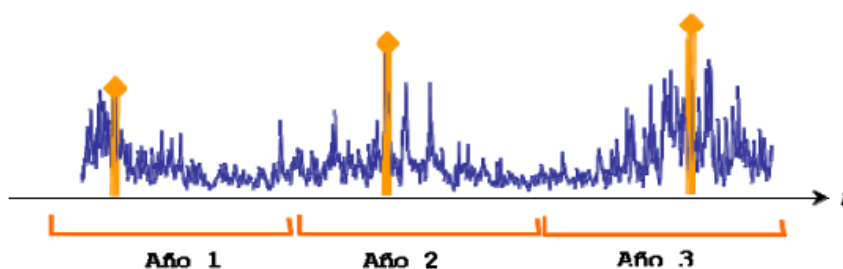


Figura 51 Método dos máximos anuais. Fonte: García (2008).

Sobre os valores máximos de cota de inundação por período de tempo, foi aplicado o modelo estatístico de extremos, conhecido como Função Generalizadora de Extremos (*Generalized Extreme Value*, GEV), o qual gera a função que descreve o comportamento dos eventos extremos ao longo do tempo, bem como a recorrência dos mesmos.

$$G(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} & \text{se } \xi \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]\right\} & \text{se } \xi = 0 \end{cases}$$

onde:

$\xi$  é o parâmetro de forma da função;

$x$  é a variável aleatória;

$\mu$  é o parâmetro de localização;

$\psi$  é o parâmetro de escala.

### 5.1.2. Confeção das Cartas de Inundação

Como produtos desta dissertação, foram construídas cartas representando o cenário médio (inundação ocorrida durante 50% do tempo analisado entre 1948 e 2008) bem como por eventos extremos com recorrência de 50, 100 e 200 anos. Para tanto, foram consideradas a recorrência dos eventos extremos e a elevação do nível do mar projetada pelo IPCC (2007) para o período equivalente.

Em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG) foi desenvolvido um modelo digital de terreno do tipo TIN (*triangulated irregular network*), sobre o qual se determinou a área inundada pelo evento em questão. Esse tipo de modelo é composto por uma rede de triângulos onde os vértices (neste caso pontos cotados) são conectados, gerando uma série de bordas até que se forme a superfície do terreno. De acordo com ESRI (2011), TINs são tipicamente utilizados para modelos de alta precisão de áreas pequenas como em aplicações de engenharia. Para a Enseada do Itapocorói os dados utilizados para geração do TIN foram pontos cotados da Secretaria do Patrimônio da União. Todos foram

transformados para o *datum* horizontal WGS-84 e referenciados verticalmente ao nível zero de Imbituba. Para a praia de Morro dos Conventos foi utilizada a topografia desenvolvida pela empresa ENGERA, descrita no Relatório de Impacto Ambiental da Fixação da Foz do Rio Araranguá (ENGERA, 2009).

## 5.2. Resultados e Discussão – Enseada do Itapocorói

### 5.2.1. Cota de Inundação

A cota de inundação foi calculada para a Enseada do Itapocorói e exemplos da recorrência dos eventos extremos para os setores exposto e protegido estão apresentadas nas figuras 48 e 49. Na Figura 52, setor exposto, é possível observar que os valores de cota de inundação, calculados com tempo de recorrência de 50, 100 e 200 anos a partir de dados de ondas propagadas (Figura 52 - azul) até a costa, foram de 3,1, m 3,2 m e 3,25 m, respectivamente. Para comparação foi calculada também a cota de inundação a partir de dados de ondas em águas profundas (dados brutos), cujas inundações atingem as cotas de 4,6, 4,8 e 4,95m para 50, 100 e 200 anos, respectivamente (Figura 52 – vermelho).

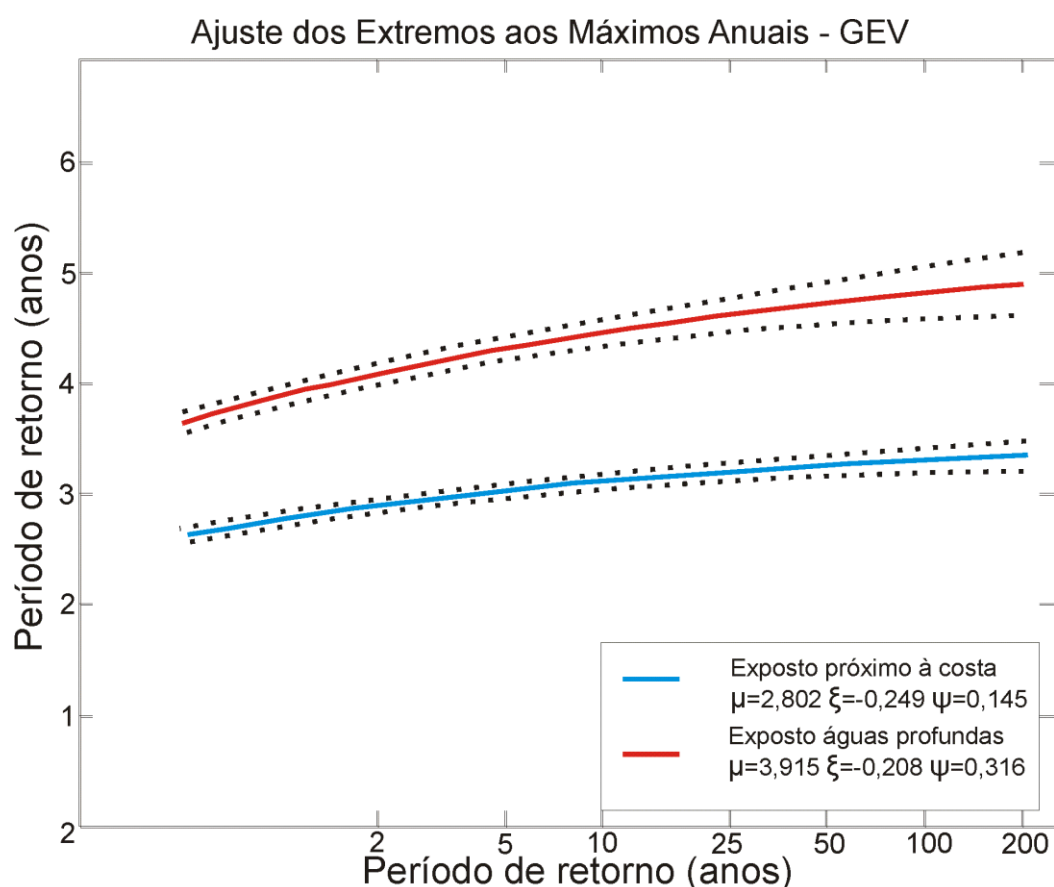
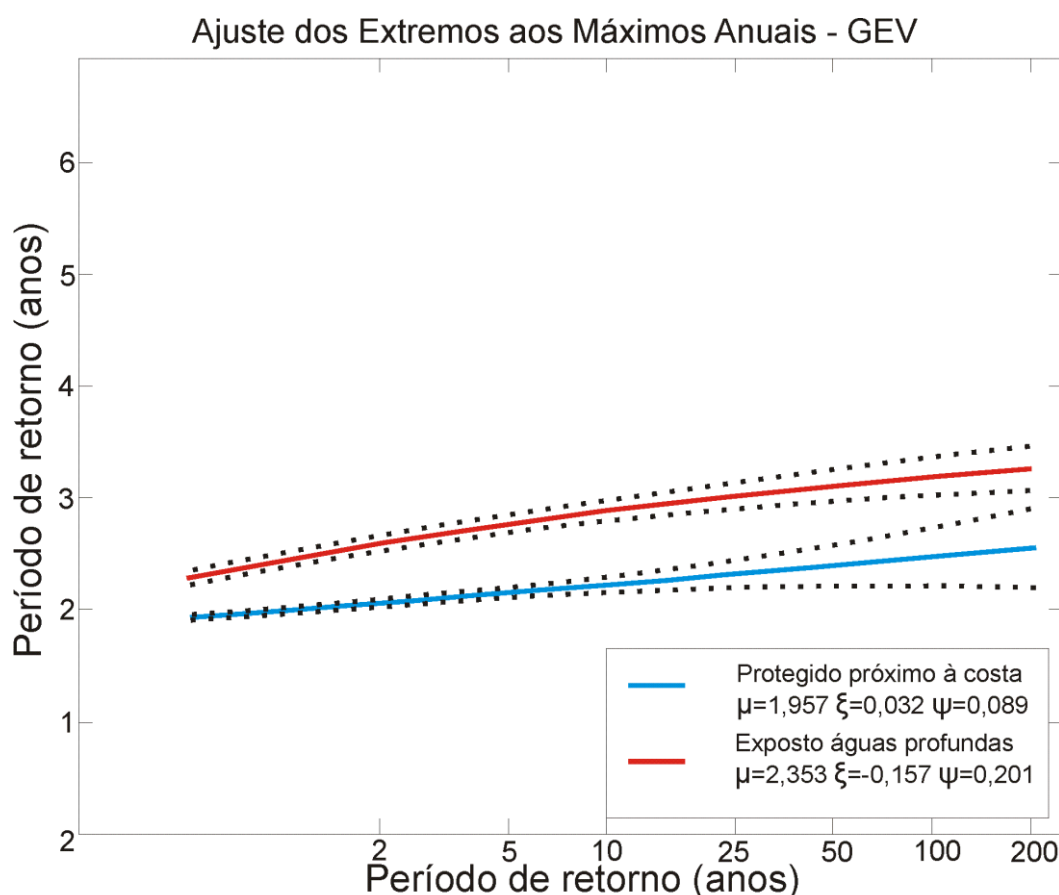


Figura 52 Recorrência da cota de inundação para o setor exposto da Enseada do Itapocorói. Em azul calculada a partir de ondas propagadas até a costa. Em vermelho calculada a partir de dados de onda em águas profundas.

Da mesma maneira, para o setor protegido (Figura 53), foi calculada a cota de inundação com recorrência de 50, 100 e 200 anos, resultando em 2,30, 2,40 e 2,50 m respectivamente para os dados obtidos através de ondas propagadas até a costa (Figura 53 - azul), e de 2,90, 3,00 e 3,10 m a partir dos dados de ondas em águas profundas (Figura 53 - vermelho). Os dados apresentados nas figuras 48 e 49 referem-se apenas ao tempo de recorrência de eventos extremos, sem considerar a elevação do nível do mar. Esta foi considerada na construção das cartas de inundação.



**Figura 53** Recorrência da cota de inundação para o setor protegido da Enseada do Itapocorói. Em azul - calculada a partir de ondas propagadas até a costa. Em vermelho - calculada a partir de dados de onda em águas profundas.

### 5.2.2. Cartas de Inundação

Foram produzidas quatro cartas de inundação do terreno para a Enseada do Itapocorói. A seguir, são apresentadas as cartas e as áreas atingidas em diferentes tempos de recorrência, as quais estão referenciadas à área da barreira onde se possui dados topográficos da Secretaria do Patrimônio da União (SPU). A primeira carta apresentada é referente à área inundada durante 50% do tempo analisado (1948 a 2008), sendo esta correspondente a 0,1 km<sup>2</sup>, ou 2,4% da área total. Em seguida, é apresentada a área atingida por um evento com tempo de recorrência de 50 anos, somando-se a elevação do nível do

mar prevista pelo IPCC (2007) para o mesmo período, chega-se a uma área de 1,1 km<sup>2</sup>, ou 26% da área total analisada. Para os tempos de recorrência de 100 anos e 200 anos, a área alagada é de 1,2 km<sup>2</sup> ou 20% da área analisada e 1,4 km<sup>2</sup> ou 33% da área estudada, respectivamente. Resumidamente, é apresentada a Tabela 4.

**Tabela 4** Área total analisada na Enseada do Itapocorói, área alagada durante 50% do tempo (entre 1948 e 2008), e áreas alagadas com tempo de recorrência de 50, 100 e 200 anos considerando a elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007).

	Área	km <sup>2</sup>	% da área total
	Total (topografia disponível)	4,2	100
Área Alagada	50% do tempo	0,1	2,4
	50 anos	1,1	26
	100 anos	1,2	29
	200 anos	1,4	33

#### 5.2.2.1. Área atingida - 50% do tempo

A área atingida 50% do tempo compreende basicamente a face da praia (Figura 54). Além desta, apenas a região da planície de alagamento próxima à desembocadura do Rio Irirí é atingida. Durante grande parte do tempo, toda a Enseada do Itapocorói está protegida da ação conjunta de marés e ondas extremas.





Figura 54 Área inundada 50% do tempo. Nota-se que, praticamente, apenas a face da praia é atingida, sendo que toda região do pós-praia não é afetada em condições normais.

#### 5.2.2.2. Área atingida - 50 anos de tempo de recorrência

Quando considerados os eventos extremos com recorrência de 50 anos, somados à elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007), nota-se que uma maior parte da enseada é atingida (Figura 55). Nos setores exposto, semiexposto e semiprotetido, onde a

barreira pleistocênica descrita por Caruso Jr. (1995) apresenta as cotas topográficas mais altas, a área alagada compreende apenas a parte frontal da barreira, chegando à sua base. O setor protegido da ação de ondas é, contraditoriamente, o setor mais afetado, o que ocorre pelo fato de este setor apresentar as cotas topográficas médias mais baixas em função da erosão da barreira pleistocênica durante o Holoceno pelos Rios Piçarras e Iriri.



Figura 55 Área atingida por eventos extremos com recorrência de 50 anos somados à elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007).

### 5.2.2.3. Área atingida - 100 anos de tempo de recorrência

A área inundada por eventos extremos com recorrência de 100 anos somados à elevação do nível do mar para o mesmo período está apresentada na Figura 56. Nota-se que uma maior parte da área total é inundada, contudo, a presença da barreira pleistocênica protege a região posterior a esta. No setor protegido, entretanto, a área atingida por esses eventos é 3% maior em relação à área total, que a atingida por eventos com tempo de recorrência de 50 anos.



Figura 56 Área alagada por eventos extremos com recorrência de 100 anos somada à elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007).

#### 5.2.2.4. Área atingida - 200 anos de recorrência

Para o tempo de recorrência de 200 anos (Figura 57), a área atingida é 7% maior (em relação à área total) que a área atingida com tempo de recorrência de 50 anos e 4% maior que a área atingida com recorrência de 100 anos. Embora o setor protegido das ondas seja totalmente alagado, percebe-se que os outros setores estão protegidos pela presença da barreira pleistocênica. A região descrita por Araujo (2008) como zona de erosão acentuada está inserida na porção Oeste do setor protegido à ação das ondas, corroborando com Ruggiero (2001) que relaciona áreas de alcance máximo das ondas com erosão praial.



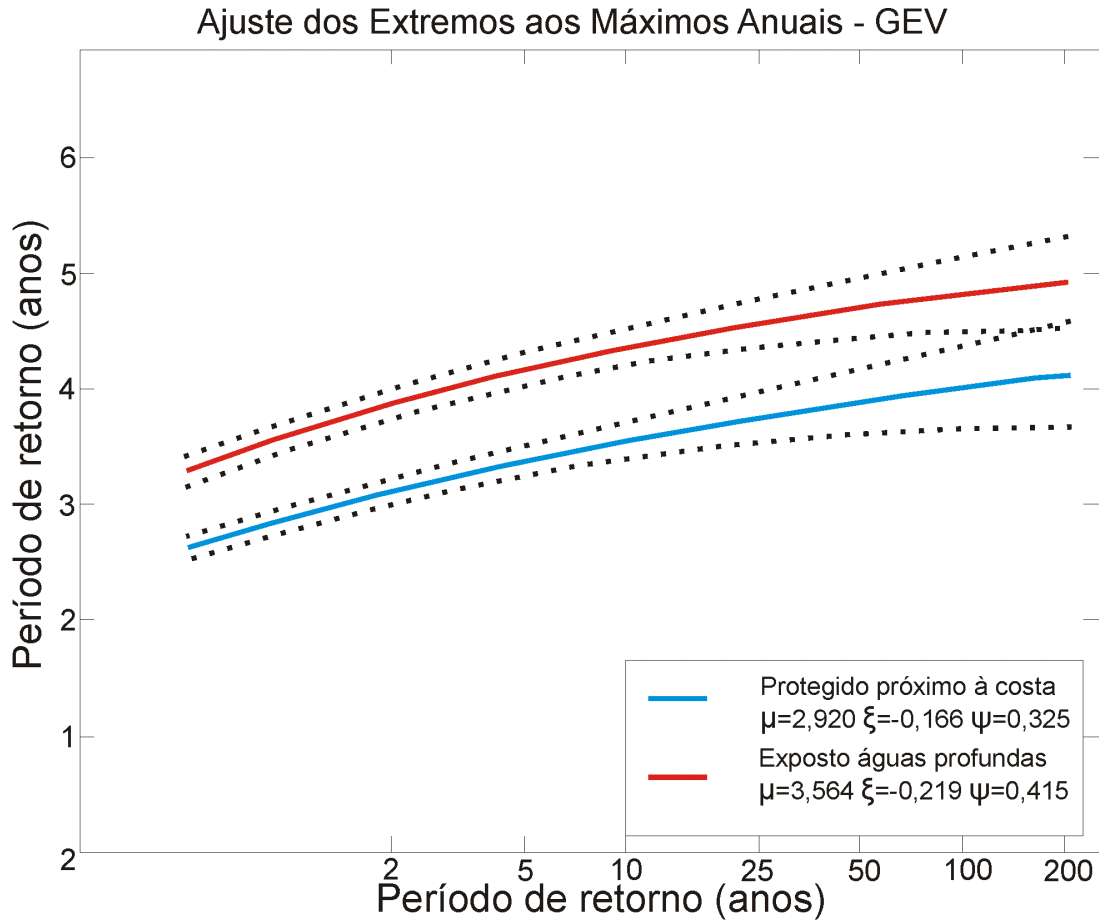
Figura 57 Área alagada por eventos com tempo de recorrência de 200 anos somados à projeção pessimista de elevação do nível do mar do IPCC (2007).

### 5.3. Resultados e Discussão - Morro dos Conventos

#### 5.3.1 Cota de Inundação

O período de retorno da cota de inundação para a praia de Morro dos Conventos é apresentado na Figura 58 sem considerar a elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007). A Figura 58 (linha azul) mostra a cota de inundação calculada a partir das ondas propagadas até a costa (Capítulo 3) e na Figura 58 (linha vermelha), a cota de inundação calculada a partir dos dados em águas profundas (brutos). É possível observar que o valor da cota de inundação é superior (ordem de 1 m), se calculado a partir de dados de águas profundas, o que representaria uma área inundada por um evento extremo significativamente maior. Desta maneira, a propagação das ondas para águas rasas é fundamental para representar de forma mais realista possível um cenário de evento extremo.

A cota de inundação, sem considerar a elevação do nível do mar (Figura 58 – linha azul), é de 3,90 m para um tempo de recorrência de 50 anos, de 4,00 m para o tempo de 100 anos e de 4,10 m para 200 anos. Para esses períodos, foi adicionado o valor de elevação do nível do mar previsto pelo IPCC (cenário pessimista) correspondente (0,315 m para 50 anos, 0,63 m para 100 anos e 1,26 m para 200 anos). Desta maneira, obtiveram-se os valores de cota de inundação para cada tempo de recorrência, a partir dos quais foram construídas as cartas de inundação.



**Figura 58** Recorrência da cota de inundação por eventos extremos para Morro dos Conventos. Em azul - calculada a partir de ondas propagadas até a costa e em vermelho, calculada a partir de dados de ondas em águas profundas.

### 5.3.2. Cartas de Inundação

A partir dos dados descritos nos capítulos 2, 3 e 4 e dos resultados gerados pelos cálculos da cota de inundação e da elevação do nível do mar descritas acima, bem como da topografia disponível, foram construídas 4 cartas para diferentes cenários. Primeiramente, foi construída uma carta para a cota atingida durante metade do tempo decorrido entre 1948 e 2008, com o intuito de se observar a área normalmente atingida por eventos de média e baixa intensidade. Foram também construídas outras três cartas para os tempos de recorrência de 50, 100 e 200 anos. A área em km<sup>2</sup> e em porcentagem da área total inundada para cada uma das cartas está descrita no Tabela 5.

**Tabela 5** Área total analisada, área alagada durante 50% do tempo (entre 1948 e 2008), e áreas alagadas com tempo de recorrência de 50, 100 e 200 anos, considerando a elevação do nível do mar prevista pelo IPCC (2007).

	Área	km <sup>2</sup>	% da área total
	Total (topografia disponível)	3,54	100
Área Alagada	50% do tempo	0,54	15
	50 anos	3,00	85
	100 anos	3,20	91
	200 anos	3,39	96

O modelo digital de terreno foi gerado apenas onde se obteve dados de qualidade, contudo, a imagem utilizada no fundo não é do mesmo momento em que foi feito o levantamento topográfico. Silva (2009) descreve a desembocadura do Rio Araranguá como altamente dinâmica, apresentando uma taxa de migração de 100 m/ano, em alguns momentos com duas desembocaduras ativas, como observado durante o levantamento topográfico da barreira. Por esse motivo, a imagem pode parecer deslocada.

#### 5.3.2.1. Área atingida - 50% do tempo

A área atingida durante 50% do tempo que se possui dados (1948 - 2008) é apresentada na **Figura 59**. Nesta, é possível observar que apenas uma pequena parte da área total é inundada. Esta área é de 0,54 km<sup>2</sup>, ou aproximadamente 15% da área onde se possui dados. Nota-se que a região Sul da desembocadura situada mais a Nordeste é o local de menores cotas e, conseqüentemente, mais inundada. Nesta região está ocorrendo o processo de crescimento do cordão arenoso a partir de sedimentos carregados pela deriva litorânea (Silva, 2009). Sendo esta uma região bastante nova, o volume sedimentar ainda é baixo, por isso o local é inundado mesmo em condições normais.

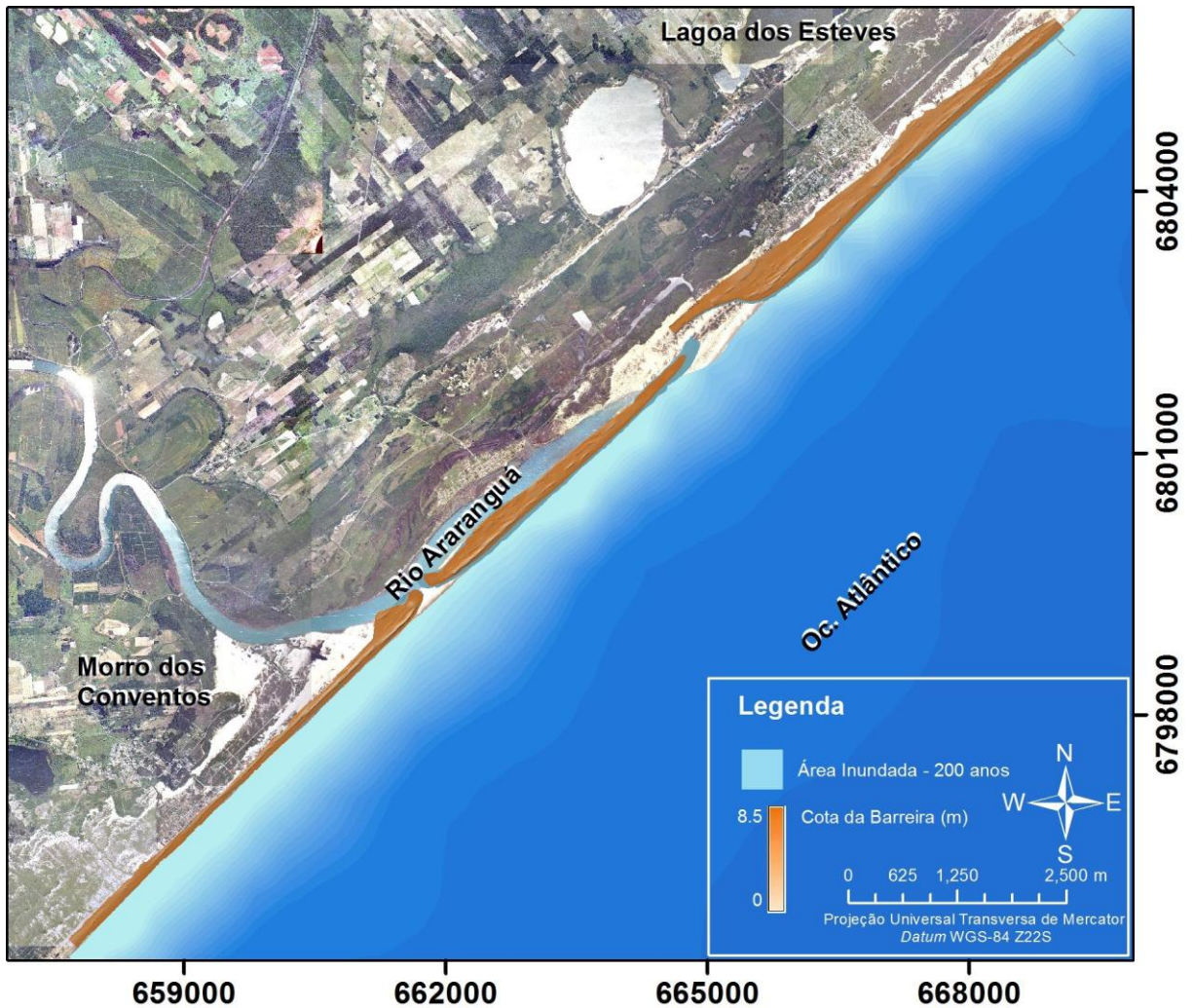


Figura 59 Área atingida 50% do tempo (baseado nos 60 anos de dados).

### 5.3.2.2. Área atingida - 50 anos de tempo de recorrência

A área inundada por eventos com tempo de recorrência de 50 anos abrange boa parte da praia do Morro dos Conventos (Figura 60), sendo uma área total de 3 km<sup>2</sup> ou aproximadamente 85% da área total. Pode-se perceber a presença de uma duna com crista orientada longitudinalmente à linha de costa, sendo a sua porção posterior também com cota inferior à calculada para um tempo de recorrência de 50 anos (4,2 m).



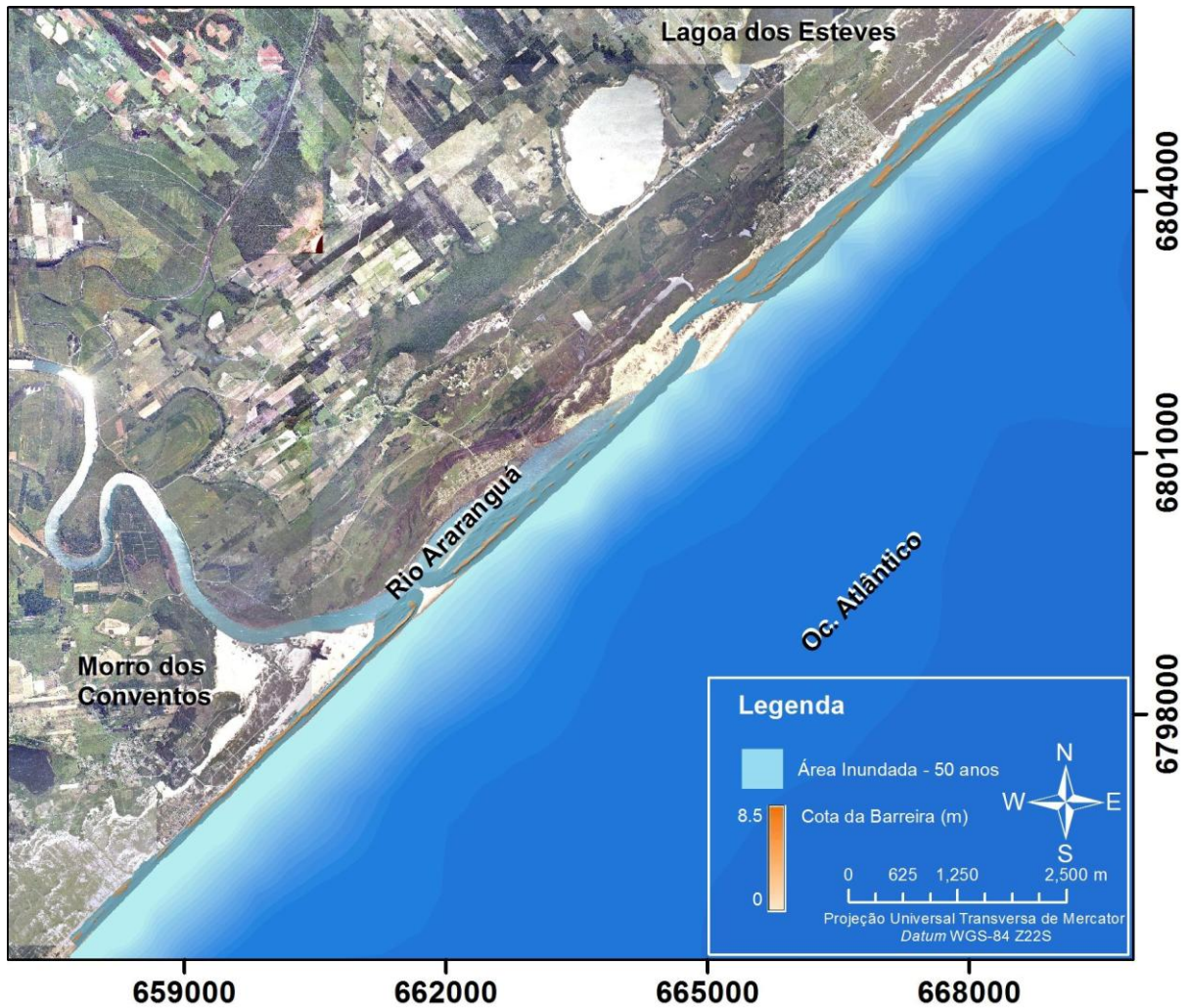


Figura 60 Carta que representa a inundação causada pela soma da elevação do nível do mar, marés astronômica e meteorológica e *wave run-up* para um tempo de recorrência de 50 anos.

### 5.3.2.3. Área atingida - 100 anos de tempo de recorrência

A cota atingida por eventos extremos com recorrência de 100 anos (4 m) somada à elevação do nível do mar (0,63 m) para este período é de 4,63 m, inundando uma área de 3,2 km<sup>2</sup> ou 90,5% da área total analisada (Figura 61). Nesta situação, praticamente todas as edificações, inclusive as situadas na porção posterior às dunas, teriam sido atingidas.

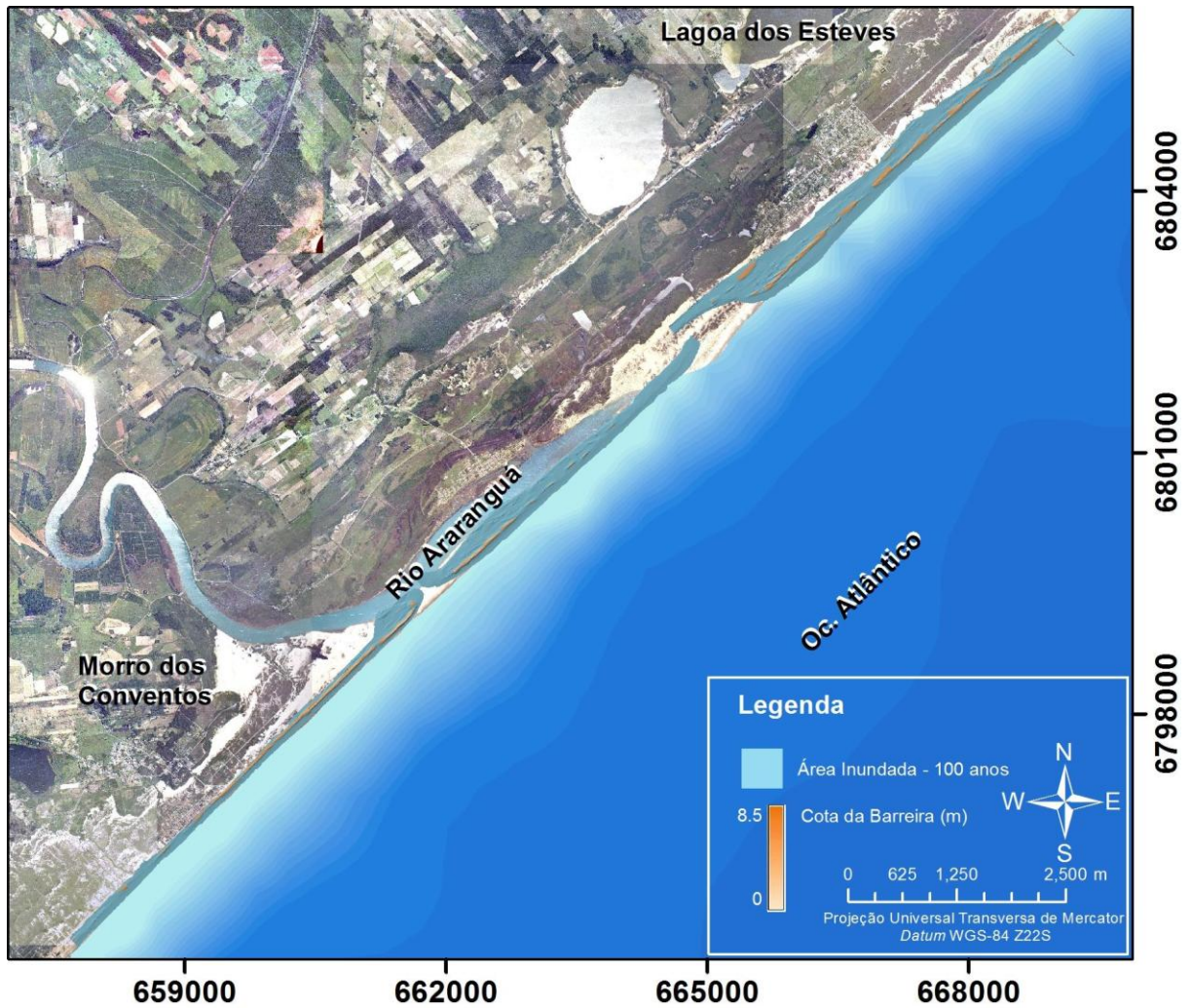


Figura 61 Representação da inundação causada pela soma da elevação do nível do mar, marés astronômica e meteorológica e *wave run-up* para um tempo de recorrência de 100 anos.

#### 5.3.2.4. Área atingida - 200 anos de tempo de recorrência

Já para eventos com tempo de recorrência de 200 anos, a cota atingida por ondas e marés é de 4,1 m e a elevação do nível do mar chega a 1,26 m. Nota-se que a barreira é praticamente toda alagada, sendo a área de 3,39 km<sup>2</sup> ou 95,89 % da área analisada (Figura 62). Deve-se levar em consideração, contudo, que a área inundada está relacionada apenas à área onde se tem dados topográficos de qualidade. É possível que a região posterior à que se possuem esses dados seja também totalmente alagada, mesmo com um menor tempo de recorrência.

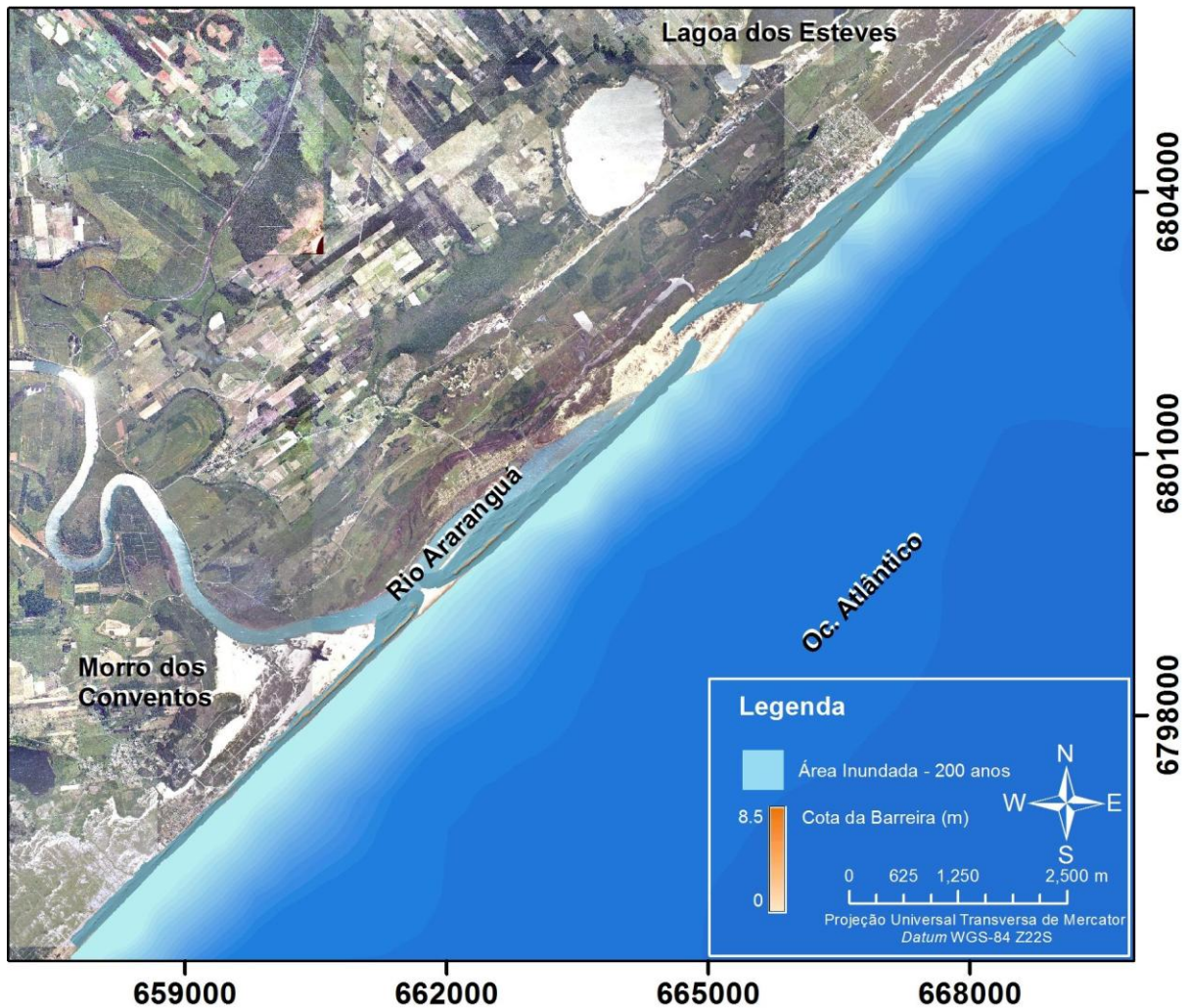


Figura 62 Área atingida por inundação causada pela soma da elevação do nível do mar, marés astronômica e meteorológica e *wave run-up* para um tempo de recorrência de 200 anos.

#### 5.4. Conclusões

A inundação em uma praia por ondas e efeitos meteorológicos é um fenômeno especialmente complexo, tanto pelo grande número de elementos que interferem no processo, como na interação entre esses elementos (G.I.O.C., 1997). Esse capítulo descreveu uma metodologia para o cálculo da cota de inundação por eventos extremos e elevação do nível do mar. O conhecimento desses fatores é de fundamental importância para os gestores públicos. A partir desse conhecimento, pode-se planejar a ocupação em áreas costeiras ainda não ocupadas de forma mais adequada bem como a retirada da população de áreas de risco como medida preventiva às catástrofes naturais.

Cartas temáticas são excelentes ferramentas para gestores. O ambiente de Sistema de Informação Geográfica auxilia na tomada de decisão, à medida que, em posse de dados

oceanográficos e topográficos de qualidade, pode-se simular casos de inundação, auxiliando no planejamento urbano. A qualidade dos dados físicos para geração das cartas é fundamental, uma vez que erros e imprecisões podem acarretar decisões errôneas dos gestores. Para a região de Morro dos Conventos, por exemplo, as cartas apresentam a área alagada, porém, pela ausência de dados de topografia do terreno na região onde as residências estão adensadas, a inundação pode ser subestimada e, conseqüentemente, inviabilizar o plano de ação em momentos de eventos extremos.

Recomenda-se que os *data* vertical de todas as fontes de dados sejam corrigidos e referenciados a um único *datum*. Desta maneira, os dados de cota atingida bem como a área alagada pelos eventos extremos podem ser definidos com maior precisão. Além disso, os levantamentos topográficos devem ser sempre atualizados e melhorados, aumentando a área de abrangência e atualizado-a, à medida que podem ocorrer variações importantes na topografia, alterando significativamente a área alagada por eventos extremos.

## CAPÍTULO 6 – Considerações Finais

---

Esse trabalho apresentou uma metodologia para avaliação da cota de inundação para diferentes tempos de recorrência. Esta se baseou em dados de maré astronômica, maré meteorológica, ondas, dados batimétricos e topográficos, além de imagens aéreas.

As marés mostraram-se importantes fatores na inundação costeira, podendo ampliar a inundação causada por ondas (em casos de marés altas) ou amenizar, em caso de marés baixas. A integração de dados de marés astronômica e meteorológica se mostrou importante na definição do nível médio instantâneo, à medida que esses podem se amplificar ou anular em função de diferenças verticais de nível geradas por forçantes gravitacionais ou atmosféricas. Contudo, os dados de maré utilizados não foram validados e estão referenciados ao nível médio do período, o que certamente acarreta em erros nas áreas alagadas e cotas atingidas.

Modelos matemáticos de ondas de gravidade são excelentes ferramentas para a transferência de dados de onda de águas profundas (onde normalmente se possui dados) para a zona de interesse. Dados de qualidade para alimentar esse tipo de modelo são fundamentais. Os dados batimétricos utilizados representaram de forma adequada toda a zona de interesse, sendo esses com menor densidade nas regiões mais profundas, onde a interação das ondas com o fundo é pequena ou nula, e mais densos na região próxima à zona de estudo. A série de ondas utilizada neste trabalho é larga o suficiente (>30 anos) para caracterizar o clima de ondas na região, sendo essa adequada para estudos de eventos extremos.

Pelo tamanho da série, torna-se inviável a propagação de todos os casos até a costa. Neste sentido, o método de seleção de máxima dissimilaridade (*MaxDiss*) unido ao método de interpolação por base radial (RBF) se mostraram excelentes ferramentas de otimização de tempo computacional, sendo possível através da propagação de 400 casos (200 em baixamar e 200 em preamar) reconstruir toda a série próximo à costa para, posteriormente, analisar a série, caracterizar o clima de ondas em águas rasas e calcular a cota de inundação.

As equações de *wave run-up* foram testadas e, posteriormente, calibradas e validadas para praias de enseada e expostas, respectivamente. A adequação das fórmulas se mostrou fundamental em praias de enseada, ao passo que as características dos parâmetros ondulatórios variam consideravelmente ao longo do arco praial. Analisando os dados,

observou-se uma clara diminuição entre as diferenças de EQM entre as equações propostas e calibradas em direção à região exposta da praia, evidenciando a robustez das mesmas em regiões expostas e sua incapacidade de representar regiões protegidas. Essa limitação foi contornada através da calibração das fórmulas para os diferentes setores analisados.

Com dados de *wave run-up* calculados para cada hora da série de dados em águas rasas e dados de maré meteorológica e astronômica para o mesmo período, foi possível calcular a cota de inundação para as áreas de estudo. Com isso, obteve-se o valor de cota atingido pelos processos de ondas e marés simultaneamente atuando na costa e calculou-se o tempo de recorrência da cota atingida por eventos extremos. Somados a esses, dados de elevação do nível do mar constituíram a cota atingida por eventos extremos com tempos de recorrência determinados. Dados topográficos de qualidade possibilitaram a construção de cartas de inundação para os tempos de recorrência de 50, 100 e 200 anos. Dessa maneira, a metodologia se mostrou eficiente e muito útil para gestores públicos, à medida que, em ambiente de sistema de informação geográfica, pode-se facilmente observar e calcular as áreas atingidas por determinados eventos, agilizando o processo de tomada de decisão e minimizando os custos decorrentes das inundações causadas por eventos extremos. Entretanto, salienta-se que para tal, é necessário o aprimoramento dos dados utilizados, especialmente os *data* vertical. Sugere-se um nivelamento entre os *data* do IBGE e DHN para as áreas de estudo a fim de se obter um menor grau de incerteza gerada pela integração dos mesmos.

## Referências Bibliográficas

AHRENS, J.P.; SEELIG, W.N. . Wave Runup on Beaches. In: 25th Coastal Engineering Conference, **Proceedings** , 1996. American Society of Civil Engineers, v 1, p.981-993.

ARAÚJO, C.S. et al.. Wave Regime Characteristics of the Southern Brazilian Coast. In: Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering (COPEDEC), Colombo-Sri Lanka. **Proceedings...** Sri Lanka., 2003 (publicado em CD, sem paginação).

ARAUJO, R.S. 2008. **Morfologia do Perfil Praial, Sedimentologia e Evolução Histórica da Linha de Costa das Praias da Enseada do Itapocorói – Santa Catarina**. 2008, 145 F. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí. 2008.

\_\_\_\_\_, R.S.; KLEIN, A. H. F.. **Relatório de Atividades de Campo (Topografia de praia e Batimetria) na Enseada do Itapocorói - SC nos dias 16 e 1 de abril de 2009**. Relatório Técnico Interno. 2009.

\_\_\_\_\_, R.S. et al.. Variation in beach morphology and identification of an erosional hot spot at Itapocorói Bay, SC. *Braz. Journal of Aquatic Science Technology*. v. 14, n.1, p. 29-38. 2010.

BIRD, E. C. F.. **Coastal geomorphology : an introduction** Second edition, John Wiley & Sons Ltda, West Sussex, 1930. 411 p.

BLACK, R. et al.. Migration as Adaptation, **Nature**, Macmillian Publishers Limited. v. 478, p.477-479. 2011.

CAMUS, P., et al., A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas, *Coastal Engineering*. 2011.

CARUSO JR., F. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Sudeste de Santa Catarina**. Brasília: DNPM, 1995. 1 mapa. Escala 1:50.000.

CERC - Coastal Engineering Research Center. **Coastal Engineering Manual**. Washington. DC. 2002.

CPE. **Modelagem Numérica como subsídio aos estudos à fixação da Barra do Rio Araranguá**. Relatório Técnico.2009.

\_\_\_\_\_, **Projeto Básico com Detalhamento Construtivo dos Molhes de Fixação do Rio Araranguá, Município de Araranguá (SC) – Produto V – Dimensionamento e Concepção da Obra – Análise das Condicionantes Geo-Ambientais e de Projeto**. Relatório Técnico. 2011.

D'AQUINO, C. A.; SCHETTINI, C. A. F.. Resposta da estrutura estuarina do rio Araranguá a um evento hidrológico. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANDO DE CIÊNCIAS DO MAR, 12., 2007, Florianópolis. **Anais...** . Florianópolis: Dd, 2007.

DAVIS, R.; FITZGERALD, D. M.. **Beaches and Coasts**, Malden: Blackwell. 2004. 418 p.

DE LUCA, C.B. 2011. **Implementação de Ferramentas Numéricas e Bases de dados no SMC-Brasil e Sua Aplicação no Estudo Piloto da Praia de Massaguaçu - Brasil**. 2011. 213 f. Dissertação (Mestrado em Ingenieria de Costas y Puertos). Universidad de Cantabria. Santander. 2011.

DEUDALL, I. W.; MAUL, G. A., Demography of coastal population. In: Schwartz, M.L. **Encyclopedia of Coastal Science**. Dordrencht: Springer. 2005. p. 368-374.

EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: <<http://www.em-dat.net/>>. Acesso em: 25 out 2011.

EPAGRI – Mapoteca Digital. Disponível em: <[http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/pre\\_download\\_elevacao.jsp](http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/pre_download_elevacao.jsp)>. Acesso em: 10 set 2011.

EGBERT G.D.; BENNETT A.F.; FOREMAN M.G.G.. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. **Journal of Geophysical Research**. v. 99m n.C12, p. 24821-24852. 1994.

\_\_\_\_\_, G.D.; EROFEEVA, S.Y.. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. v. 19, p. 183-204. 2002.

ESRI ArcGIS Desktop 9.3 Help. Disponível em: <[webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Working\\_with\\_TIN\\_surfaces](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Working_with_TIN_surfaces)> acesso em 10 dez 2011.

FLEMMING, B. W.. Tidal Environments. In: SCHWARTZ, M. L.. **Encyclopedia of Coastal Science**. Dordrencht: Springer, 2005. p. 954-958.

FUNDESPA (Brasil). **Estudos Técnicos e Ambientais, Topográficos e Hidrográficos nas Regiões de Araranguá, Torres e Tramandaí**: Relatório Segundo. São Paulo, 2004

GARCÍA, M. M. 2008. **Metodología Para El Análisis Estadístico no Estacionário de Valores Extremos de Variables Geofísicas**. 2008. 408 p. Tese (Doutorado em Ingenieria de Costas y Puertos). Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Santander. 2008.

G.I.O.C., Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. **Atlas de inundación del litoral peninsular español**. Universidad de Cantabria. 1997. 59 p.

GORNITZ, V.. Storm Surge. In: SCHWARTZ, M. L.. **Encyclopedia of Coastal Science**. Dordrencht: Springer, 2005. p. 912-914.

HERRMANN, M. L. P. (org). **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis : IOESC, 2006, 136 p.

HOLMAN, R.A.; GUZA, R.T.. Measuring run-up on a natural beach. **Coastal Engineering**, v. 8, p. 129-140. 1984.

\_\_\_\_\_, R.A.. Extreme value statistics for wave runup on a natural beach, **Coastal Engineering Journal** v. 9. p. 527-544. 1986.



HOLTHUIJSEN, L. H.. **Waves in oceanic and coastal waters**. Cambridge: Cambridge University Press. 2007. 387p.

HUGES, S. 2003. **Estimating Irregular Wave Runup on Smooth, Impermeable Slopes**. ERDC/CHL CHETN-III-68. US Army Corps of Engineers.

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** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IHO (International Hydrographic Organization). 2009. **Chart Specifications of the IHO and Regulations for International (INT) Charts (S-4)**, Edição 3.007. Monaco: International Hydrographic Bureau. 392 p.

INPE, 2011. **Desastres Naturais Janeiro a Dezembro de 2011**. Núcleo de Pesquisa e Aplicação de Geotecnologias em Desastres Naturais e Eventos Extremos. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/desastres5.php>> acesso em 27 out 2011.

KENNARD, R.W.; STONE, L.A.. Computer aided design experiments. **Technometrics** v. 11. p. 137–148. 1969.

KOMAR, P. D.. **Beach Processes and Sedimentation**. New Jersey: Prentice Hall, 1976.

MARCELINO, E. V. **Desastres Naturais e Feotecnologias: Conceitos Básicos**. Versão Preliminar, INPE, Santa Maria, 2007. 20 p.

\_\_\_\_\_, E. V.; GOERL, R. F.; RUDDORF, R. M. Distribuição espaço-temporal de inundações bruscas em Santa Catarina (período 1980-2003). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS. 2004, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. O. 554-564.

MCGRANAHAN, G.; BALK, D., and ANDERSON, B. The Rising Tide: Assessing the Risks of Climate Change and Human Settlements in Low Elevation Coastal Zones. **Environment & Urbanization**. v. 19. n. 1. p. 17-37. 2007.

NIELSEN, P.; HANSLOW, D. J.. Wave runup distributions on natural beaches. **Journal of Coastal Research**. v. 4 n. 7. p. 1139-1152. 1991.

NUNES, A.L. **Determinação das Marés Meteorológicas na Região da Baía do Espírito Santo e sua Influência na Drenagem de Águas Continentais**. 131 p. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Gestão de Águas Interiores e Costeiras. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2007.

PARK, D.. **Waves, Tides and Shallow-Water Processes**. Oxford: Butterworth- Heinemann (Elsevier), 2008.

PARKER, B.. Tides. In: SCHWARTZ, M. L.. **Encyclopedia of Coastal Science**. Dordrecht: Springer, 2005. p. 987-996.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I.. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophysics Research Letter**. v. 32. 2005.

RAMIRES, M. P. **Estudio de La Estabilidad de lãs Palyas em La Enseada de Itapocoói (SC, Brasil)**. 184 p. 2010. Dissertação (Mestrado em Ingenieria de Costas y Puertos). Universidad de Cantabria. Santander. 2010.

RUGGIERO, P., et al., Extreme waves and coastal erosion in the Pacific Northwest, Ocean Wave Measurement and Analysis, in: 3rd International Symposium, Waves '97, **Proceedings...** 1997. p. 947-961.

\_\_\_\_\_, P. et al.. Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of Properties Backing Beaches. **Journal of Coastal Research**, West Palm Beach (Florida). v. 17 n.2, p 407-419. 2001.

\_\_\_\_\_, P.; HOLMAN, R. A., Beach, R. A.. Wave run-up on high-energy dissipative beach. **Journal of Geophysical Research**, v. 109. 2004.

SHAND, T.D., et al.. Empirical modelling of run-up and overtopping at a boulder beach, Raglan, New Zealand. **Coasts and Ports 2007**; Melbourne, Australia, July, 2007.

SIEGLE, E.; ASP, N. E.. Wave Refraction and Longshore Transport Patterns Along the Southern Santa Catarina Coast. **Brazilian Journal of Oceanography**, São Paulo, v. 2, n. 55, p.109-120, 2007.

SIGNORIN, M., **Análise e Comparação do Clima de Ondas do Norte, Centro e Sul do Estado de Santa Catarina Utilizando Modelagem Numérica**. 2010. 95 f. Monografia (Graduação) - Centro de Ciências Tecnológicas, da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2010.

SILVA, G. V., **Análise da Estabilidade Quanto à Posição das Desembocaduras do Rio Araranguá, da Barra do Camacho e do Rio da Madre, Litoral Sul e Centro do Estado de Santa Catarina**. 2009. 66 f. Monografia (Graduação) - Centro de Ciências Tecnológicas, da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2009.

SRTM Disponível em: <<http://seamless.usgs.gov/>> Acesso: 10 set 2011.

THE SWAN TEAM (2009). Scientific and Technical Documentation. Disponível em: <<http://www.swan.tudelft.nl>> Acesso: 05 jan 2011.

TAW, 2002, **Technical Report Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes**. Technical Advisory Committee on Flood Defence. Delft. 2002.

VAN DER MEER, J. W.; STAM, C-J.M. Wave Runup on Smooth and Rock Slopes of Coastal Structures. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**. New York, N.Y.. V. 118, n. 534. 1992

WILLET, P., 1996. Molecular diversity techniques for chemical databases. Information Research 2 (No. 3). Disponível em: <<http://informationr.net/ir/2-3/paper19.html>> Acesso em: 23 set 2011.